

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**LOKALIZACE V RÁMCI TECHNOLOGIE LORAWAN**

LOCALIZATION IN LORAWAN TECHNOLOGY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jan Pospíšil**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Radek Fujdiak, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Jan Pospíšil

**ID:** 174381

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Lokalizace v rámci technologie LoRaWAN

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Bude provedena analýza technologie LoRaWAN a současného stavu problematiky lokalizačních technik v rámci této technologie. Student navrhne na základě dostupných materiálů, literatury a vlastního postupu vhodnou metodu pro lokalizaci pomocí technologie LoRaWAN. Následně tuto metodu implementuje a bude provedeno experimentální ověření funkčnosti v různých vybraných scénářích pro ověření teoretických odhadů přesnosti. V neposlední řadě pak bude provedena optimalizace (zpřesnění) a finální testování. Výstupem tak bude implementované, otestované a zoptimalizované řešení pro lokalizaci u technologie LoRaWAN.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] „LoRaWAN What is it?: A technical overview of LoRa and LoRaWAN.“ LoRa Alliance. 2015.

[2] „LoRa Specification.“ LoRa Alliance. 2015.

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 16.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Radek Fujdiak, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Diplomová práce se v teoretické části zabývá obecně LPWAN, tedy sítěmi pro nízkoenergetická bezdrátová zařízení spadající do kategorie IoT se zaměřením na LoRaWAN™. Druhá polovina teoretické části je zaměřena na popsání obecných technik a principů lokalizace bezdrátových zařízení s následnou selekcí metody vhodné pro aplikaci v LoRaWAN™. Praktická část je pak zaměřena na potřebné úpravy HW pro umožnění lokalizace v této síti. Dále je popsán celý postup zprovoznění kompletní sítě, je vysvětlen lokalizační algoritmus využívající principu TDoA, provedena simulace a je ověřena funkčnost reálným měřením v terénu. Na závěr jsou naměřené výsledky odůvodněny a jsou popsány nedostatky, případné možnosti pro vylepšení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

LoRa®, LoRaWAN™, bezdrátový senzor, brána, lokalizační techniky, IoT, TDoA

## ABSTRACT

The diploma thesis in theoretical part focuses on LPWAN in general, meaning the low power wireless device falling into IoT category with a focus on LoRaWAN™. The second half of the theoretical part focuses on describing localization techniques and principles in general and selection of one suitable technique for implementation in LoRaWAN™. The practical part focuses on the proper HW customizations to enable the localization in this network. There are also described all the steps needed to build the whole working LoRaWAN™ network. The TDoA localization algorithm is described, the functionality is verified by simulation and also by testing under real conditions. In the end, the results are explained, the shortcomings of the technology are described and finally a suggestion for improvement is provided.

## KEYWORDS

LoRa®, LoRaWAN™, wireless sensor, gateway, localization techniques, IoT, TDoA

POSPÍŠIL, Jan. *Lokalizace pomocí protokolu LoRaWAN*. Brno, Rok, 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Radek Fujdiak, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Lokalizace pomocí protokolu LoRaWAN“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radkovi Fujdiakovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také bych rád poděkoval společnosti IPKA s.r.o za podporu při výrobě brán, své rodině a blízkým za podporu během celého trvání studia.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 LPWAN - Low power wide area network</b>	<b>12</b>
1.1 Hlavní charakteristiky LPWAN	12
1.2 LPWAN - komplexní ekosystém	13
1.3 Licencovaná vs. nelicencovaná pásma	14
1.4 Technologie z kategorie LPWAN	14
<b>2 LoRa® a LoRaWAN™</b>	<b>15</b>
2.1 LoRa® PHY fyzická vrstva	15
2.1.1 Chirp Spread Spectrum (CSS) modulace	16
2.1.2 LoRa® - modulace	17
2.1.3 Prahová citlivost přijímače	18
2.1.4 LoRa® - fyzický rámec	19
2.2 LoRaWAN™ komunikační protokol	19
2.2.1 Komponenty LoRaWAN™ sítě	20
2.2.2 Životnost baterie	21
2.2.3 Kapacita sítě	22
2.2.4 Kategorie zařízení	22
2.2.5 MAC příkazy	23
2.2.6 Formát LoRaWAN™ zpráv	24
2.2.7 Adresy a klíče koncových zařízení	26
2.2.8 Metody připojení koncového zařízení: OTAA a ABP	27
<b>3 Lokalizační techniky</b>	<b>28</b>
3.1 Cell identification (CI)	28
3.2 Time of arrival (TOA)	30
3.2.1 One-way TOA	30
3.2.2 Two-way TOA	30
3.3 Time difference of arrival (TDOA)	31
3.4 Received signal strength (RSS)	33
3.5 Angle of arrival (AOA)	34
3.6 Lokalizace v LoRaWAN™ síti	35
<b>4 Výsledky studentské práce</b>	<b>37</b>
4.1 Bezdrátový senzor pro testování lokalizace	37
4.2 Program pro vizualizaci polohy senzoru	38
4.2.1 Lokalizační algoritmus	40

4.3	Testování LoRaWAN™ sítí ČRa a VUT . . . . .	43
4.3.1	Sít' Českých Radiokomunikací . . . . .	43
4.4	Vlastní řešení . . . . .	45
4.4.1	Dostupnost hardware na trhu . . . . .	45
4.4.2	Úprava hardware . . . . .	46
4.4.3	Příprava OS pro Raspberry Pi . . . . .	48
4.4.4	Packet-forwarder na Raspberry Pi . . . . .	50
4.4.5	LoRaWAN™ Network Server na Raspberry Pi . . . . .	53
4.4.6	Simulace . . . . .	61
4.4.7	Výsledky měření . . . . .	63
4.4.8	Filtrace dat . . . . .	63
4.4.9	Důvody vzniku chyby vypočtené polohy . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>69</b>
	<b>Literatura</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>76</b>
<b>B</b>	<b>Návrh LoRaWAN™ koncentrátoru</b>	<b>77</b>
<b>C</b>	<b>Brány pro testování lokalizace</b>	<b>80</b>



# Seznam obrázků

2.1	Komunikační model LoRa technologie . . . . .	15
2.2	Průběh chirp signálu . . . . .	16
2.3	Technika rozprostření signálu u DSSS modulace . . . . .	16
2.4	Topologie LoRaWAN™ sítě . . . . .	20
2.5	Architektura LoRaWAN™ protokolu . . . . .	21
2.6	Třídy zařízení v síti LoRaWAN™ . . . . .	23
2.7	Formát zpráv LoRaWAN™ protokolu . . . . .	25
3.1	Lokalizace pomocí Cell ID . . . . .	29
3.2	Lokalizace pomocí TOA trilaterace . . . . .	31
3.3	Lokalizace pomocí TDOA trilaterace . . . . .	32
3.4	Lokalizace pomocí AOA bilaterace . . . . .	34
3.5	AoA triangulace (jeden cíl a 2 dva přijímače) . . . . .	35
3.6	Lokalizace v síti LoRaWAN™ . . . . .	36
4.1	Blokové schéma bezdrátového testovacího senzoru. . . . .	37
4.2	Náhled lokalizační aplikace. . . . .	39
4.3	Vývojový diagram programu pro vizualizaci . . . . .	41
4.4	Pozice bran Českých radiokomunikací (pouze Brno). . . . .	43
4.5	Histogram přesnosti výpočtu pozice senzoru. . . . .	44
4.6	Výsledky lokalizace v síti Českých radiokomunikací. . . . .	44
4.7	Vytvořená vlastní brána pro Raspberry Pi. . . . .	46
4.8	Schéma propojení LoRa koncentrátoru. . . . .	47
4.9	Schéma propojení IMST iC880A-SPI koncentrátoru. . . . .	48
4.10	Redukční deska s GPS (vlevo) pro koncentrátor IMST (vpravo). . . . .	49
4.11	Detail administrace LoRa severu. . . . .	59
4.12	Zachytávání MQTT zpráv do souboru v Node-RED. . . . .	61
4.13	Výsledky simulace chybovosti lokalizačního algoritmu. . . . .	62
4.14	Vizualizace z reálného prostředí: surová data. . . . .	63
4.15	Aplikovaný filtr klouzavých průměru mediánů. . . . .	64
4.16	Aplikovaný filtr klouzavých průměru mediánů: velikost chyby. . . . .	65
4.17	Histogram ze 72 odeslaných zpráv. . . . .	65
4.18	Filtrace naměřených dat: graf. . . . .	66
4.19	Rozdíly časových značek příchozích rámců mezi 4 branami. . . . .	68
B.1	RF část LoRaWAN™ koncentrátoru . . . . .	77
B.2	Integrované obvody SX1301 a SX1257 LoRaWAN™ koncentrátoru . . . . .	78
B.3	Napájecí obvod LoRaWAN™ koncentrátoru . . . . .	79
B.4	GPS část LoRaWAN™ koncentrátoru . . . . .	79
B.5	Řídící počítač připojený k LoRaWAN™ koncentrátoru . . . . .	79

C.1	Brány připravené na testovací měření . . . . .	80
C.2	Rozmísťování LoRaWAN™ brán pro měření . . . . .	80

# Seznam tabulek

2.1	LoRa® datové rychlosti, doby přenosu a faktory rozprostření . . . . .	17
2.2	Detekce chyby a opravné schopnosti LoRa® . . . . .	18
2.3	Prahová citlivost Semtech SX1276 čipů . . . . .	18
2.4	Formát rámce LoRa® uplink PHY zprávy . . . . .	19
2.5	Maximální velikosti payloadu LoRaWAN™ protokolu . . . . .	26
4.1	Porovnání průměrné úrovně kvality (ze 150 vzorků) příjmu LoRa® kon- centrátorů. . . . .	47
4.2	Srovnání průměrných výpočtu polohy . . . . .	64
4.3	Srovnání rozdílů časových značek mezi bránami . . . . .	67

# Úvod

Digitální revoluce stále pokračuje a po celém světě vznikají nové technologie usnadňující lidem jejich každodenní činnost. Jednou z těchto technologií je i LoRaWAN™ síť spadající do kategorie LPWAN. Tato síť byla vytvořena za účelem připojení malých, cenově dostupných, bateriově poháněných, bezdrátových zařízení, které mají sloužit převážně v domácnostech a v průmyslu, jako čidla a senzory nejrůznějšího druhu. Jedním z příkladů může být čidlo detekce záplavy umístěné v koupelně rodinného domu, které v případě zatopení upozorní majitele o možné hrozbě. Tímto způsobem lze alespoň omezit následnou katastrofu. Další příkladem může být teplotní senzor vysílající údaje o teplotě. Toto čidlo může být například umístěno v kabině nákladního vozu a kontrolovat tak bezpečnou teplotu převáženého nákladu. V tomto případě nastává otázka, zda by bylo možné nějakým způsobem tento senzor lokalizovat a získat tak informace o poloze nákladního vozu. Přičemž by byla dostačující přesnost i na stovky metrů v případě, že by nemuselo dojít k úpravě ať už firmware nebo hardware senzoru.

Tato práce poskytuje úvod do problematiky LPWAN. V teoretické části je proveden detailní rozbor LoRaWAN™ protokolu. Přičemž jsou vysvětleny rozdíly mezi LoRa® a LoRaWAN™; a detaily fungování celé technologie. V teoretické části jsou dále popsány univerzální principy a techniky lokalizace bezdrátových zařízení. Praktická část se věnuje seznámení s prostředím dvou LoRaWAN™ sítí: VUT v Brně a ČRa, kdy měla být vyzkoušena funkcionality této technologie. Přičemž jsou podle teoretického rozboru stanoveny požadavky na síť pro umožnění lokalizace. Dále je navržena metoda výpočtu lokalizace pomocí analytického lineárního řešení, které hledá průsečíky hyperbol. Z definovaných výsledků obou testovaných sítí se dospělo k názoru, že první síť je schopna lokalizace pouze v omezeném měřítku a druhá síť není schopna lokalizace vůbec. Z toho důvodu bylo přistoupeno k návrhu vlastní testovací LoRaWAN™ sítě, ve které může být lokalizační algoritmus odladěn. Jedná se tedy o kompletní oživení jak sítě jako celku, tak i HW samotných brán. Vývoj lokalizačního software je také předmětem této práce, kdy se jednalo o definování a implementaci algoritmu pro výpočet polohy. Dále je výpočetní algoritmus ověřen simulací a na závěr je lokalizace pomocí TDoA otestovaná v reálných podmínkách. Na základě provedeného měření je na naměřená data aplikován filtr, který provádí eliminaci odlehlých výpočtů.

# 1 LPWAN - Low power wide area network

V současnosti vznikají po celém světě nové technologie, které mají za cíl zjednodušit lidem jejich každodenní činnost. Dosud se bezdrátová zařízení, která jsou jakkoliv připojitelná do internetu, definují jako IoT (Internet of Things) zařízení. Výraz IoT popisuje každé zařízení, které může být připojeno do internetu použitím jakéhokoli typu radiového spojení. Do skupiny IoT spadají ze široka zařízení s maximální rychlostí přenosu dat od jednotek bitů až po desítky megabitů za vteřinu. Dosahy se mohou také lišit od jednotek centimetrů až po desítky kilometrů. Bezdrátová komunikace může být provozována v licencovaných i nelicencovaných pásmech [1].

Cílem této kapitoly je blíže popsat LPWAN spadající do kategorie IoT se zaměřením na LoRaWAN™. Důvod vzniku LPWAN (Low-power Wide-area network) je přenos dat přes velkou geografickou oblast, kde dostačuje malá datová rychlost. Dosah takových sítí může být i několik kilometrů, přičemž datová rychlost se pohybuje od desítek bitů až několik kilobitů za vteřinu. LPWAN je nová technologie, která je speciálně navržena tak, aby poskytovala nekomplexní, spolehlivý a levný způsob komunikace pro zařízení, která jsou umístěná ve velkých vzdálenostech od sebe, při zachování nízké spotřeby energie a nenáročnou rychlostí přenosu dat. Tato technologie tak nově přináší nové možnosti pro aplikace, které dříve nebyly vůbec realizovatelné. Předpokládá se, že vznik takového typu sítě je primárně spojen s potřebami přenosu dat zařízení se zabudovanými technologiemi umožňující interakci mezi sebou a s vnějším prostředím. U takových zařízení není zpravidla rychlost přenosu dat tak důležitá, jako dlouhodobý provoz na baterii, nízká cena a v neposlední řadě nízká cena za přenos dat. *Tato kapitola čerpá především z článku IoT: The era of LPWAN is starting now [2].*

## 1.1 Hlavní charakteristiky LPWAN

Sítě typu LPWAN pokrývají širokou oblast možných aplikací, existují ale společné požadavky, které by se měly dodržovat při návrhu nových sítí spadajících do této kategorie a to podle následujících kritérií:

- Energeticky velmi úsporný provoz je základním požadavkem pro vyhnutí se časté výměně baterií a pokud je možné, vyhnout se použití baterií úplně. Výměna baterií u několika milionů zařízení by měla velmi špatný ekologický dopad. U knoflíkových baterií dochází ke zkrácení životnosti, pokud proudové špičky přesahují odběr 30–50 mA, z čehož vyplývá vyloučení zvýšení dosahu zařízení skrze vysoký vysílací výkon.

- Ekonomická náročnost má velký vliv. Rozšíření mezi širokou veřejnost by mělo být finančně nenáročné. To znamená nízká cena zařízení, nenáročné zprovoznění a minimální nároky na údržbu. Jednoduchý hardware a software zařízení, tedy jednoduchá architektura i použité protokoly. Také je vhodné se vyhnout drahým součástkám jako jsou TXCO a SAW filtry atd.
- Omezení aktivity zařízení se může lišit podle typu aplikace. Pro snížení spotřeby zařízení by síť neměla vyžadovat probouzení zařízení v případě, že není potřeba odesílat nebo přijímat data. Tímto je v zásadě vyloučen jakýkoliv druh synchronizované sítě nebo mesh sítě. Pro přístup k médiu je v tomto případě preferovaná metoda Aloha. Pro připojení bezdrátových zařízení je volena síť typu hvězda.
- Síťová infrastruktura by měla být snadno nasaditelná na celostátní úrovni s kvalitním celoplošným pokrytím a možností rozšíření na další území. Rozšíření infrastruktury a stejně tak přidání koncového zařízení do sítě by měl být jednoduchý úkon. Komunikační protokol by se měl držet standardů pro zajištění dostupnosti různých zařízení a jejich jednoduché připojení do sítě.
- Přenos dat od koncového zařízení až po koncového uživatele by měl být plně zabezpečen. Nešifrovaný payload by neměl být operátorům sítě zpřístupněn. Jako součást zabezpečení by mělo být radiové spojení odolné vůči blokování jednotlivých rozhraní.
- Ve většině aplikací má přidanou hodnotu jednoduchá lokalizovatelnost, nejlépe bez využití energeticky náročné GPS.
- Koncová zařízení se obecně pohybují pomalu nebo se nepohybují vůbec, mohou však být umístěny v blízkosti rychle se pohybujících objektů, jako jsou např. dálnice. Modulace signálu by měla být robustní, aby těmto podmínkám odolala.
- Z pohledu na perspektivu aplikace budou zařízení poskytovat data, která budou využita k vytváření velkého množství služeb a to buď přímo, nebo prostřednictvím složitých procesů datové fúze a strojového učení.

## 1.2 LPWAN - komplexní ekosystém

LPWAN je tvořena z následujících částí: koncová zařízení, síťová infrastruktura, protokoly, síťové radiče, síťové servery, aplikační servery a uživatelské rozhraní. To všechno může být nabízeno jako kompletní řešení na klíč, navrženo jedním dodavatelem (SigFox), nebo jako řešení několika dodavatelů nabízejících úzkou spolupráci s různými společnostmi, kteří nabízejí služby okolo společně vytvořeného konceptu (např. LoRaWAN™).

## 1.3 Licencovaná vs. nelicencovaná pásma

Provozovatelé mobilních bezdrátových sítí mají veliký zájem vyvíjet nové standardy pro LPWAN konektivitu, za účelem rozšíření portfolia služeb. 3GPP RAN má na starost definování specifikací bezdrátového širokopásmového připojení pro licencovaná pásma. V Release 13 se počítá i s IoT, který obsahuje předběžnou definici pro LPWAN řešení převážně založené na 4G-LTE rozšíření (např. LTE Cat-M nebo NB-LTE). Licencovaná pásma jsou pro mobilní operátory nákladná, ceny se pohybují v řádu statisíců euro za jednotlivé kmitočty v každé zemi. IoT zařízení, která jsou provozována v LTE síti, se řídí stejným přístupem klasických 4G sítí s využitím koncepce SIM karet (nebo e-SIM) pro zabezpečení, což vede ke zvýšení nákladů na jednotlivé zařízení. Zavádění bylo postupně zahájeno v letech 2016–2017. Přestože operátoři spouštějí služby v oblasti LPWAN, jako rozšíření stávající 4G-LTE sítě, jejich snahou je, aby implementace IoT byla poslední investicí do stávající sítě. Toto řešení obnáší využití části komplexní 4G-LTE architektury, což v podstatě znamená ještě větší komplexnost, náklady a vysoké nároky na výkon oproti sítím provozovaných v nelicencovaných pásmech. Geografické pokrytí sítí 4G je také obecně soustředěno na hustě obydlené městské oblasti, což zanechává venkovské oblasti s minimálním nebo žádným pokrytím. Z tohoto pohledu může být vyloučeno využití v inteligentním zemědělství nebo kontrola životního prostředí. Na druhou stranu zařízení připojená do této sítě mají zaručenou kvalitu služeb (QoS) díky osvědčenému bezpečnostnímu schématu a garantované latenci.

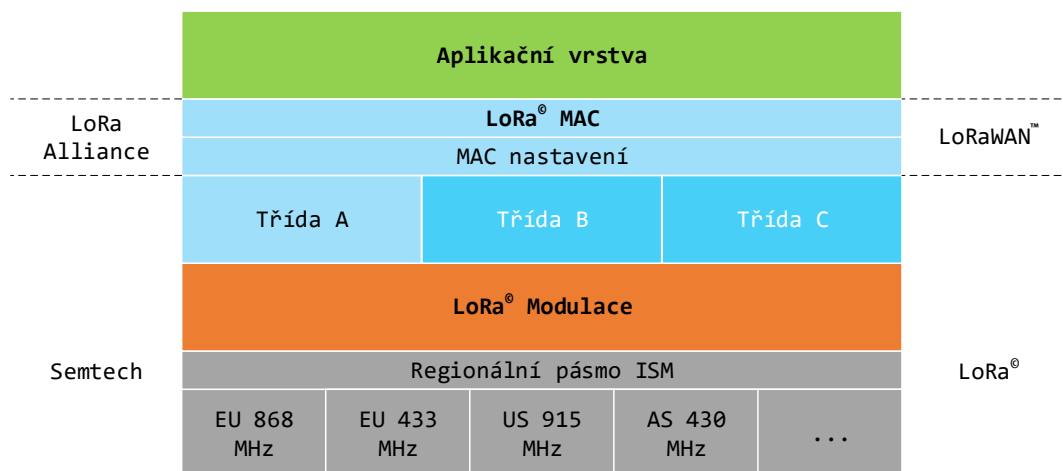
Provozovatelé těchto sítí se snaží konkurovat sítím, které jsou provozované v nelicencovaných pásmech. Skutečnost je taková, že cílové trhy obou typů jsou jiné. Zatímco provoz na licencovaných pásmech je důležitější pro vybrané profesionální služby, kde je důležitá vysoká kvalita, naopak provoz v nelicencovaném pásmu nabízí obecně lepší pokrytí, nižší výkon a nižší náklady na úkor kvality služeb a negarantované latenci.

## 1.4 Technologie z kategorie LPWAN

Se zvyšujícím se zájmem o IoT zařízení, se zvyšují i požadavky pro nový komunikační standard vhodný pro tyto účely. Hlavními požadavky pro nové protokoly jsou jednoduchost, nízký výkon a dosah z těžko přístupných míst. Zařízení, která implementují tyto protokoly, by měla být levná, zásadní je také dlouhodobá výdrž zařízení poháněného z baterie. Několika komunikačním protokolům se podařilo splnit tato kritéria. Jedním z nich je LoRa vyvíjená firmou Semtech a LoRa-Alliáncí. Samotné označení lze rozložit na dvě části: LoRaWAN<sup>TM</sup> protokol a LoRa<sup>®</sup> modulace. Této problematice se dále věnuje kapitola 2.

## 2 LoRa<sup>®</sup> a LoRaWAN<sup>™</sup>

LoRaWAN<sup>™</sup> definuje komunikační protokol a architekturu sítě, zatímco fyzická vrstva LoRa<sup>®</sup> umožňuje komunikační spojení. LoRa<sup>®</sup> modulaci lze přiřadit k fyzické vrstvě ISO/OSI modelu. LoRaWAN<sup>™</sup> leží nad fyzickou vrstvou. Hierarchie viz obr. 2.1. Protokol a síťová architektura mají největší vliv na určení životnosti baterie koncového zařízení, kapacitu sítě, kvalitu služeb, zabezpečení a rozmanitost aplikací obsluhovaných sítí [3].



Obr. 2.1: Komunikační model LoRa technologie [3].

### 2.1 LoRa<sup>®</sup> PHY fyzická vrstva

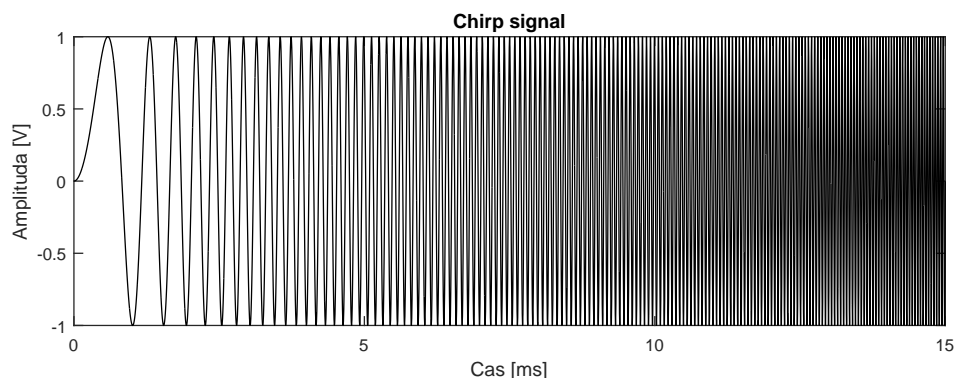
Název LoRa<sup>®</sup> je odvozen ze slov Long Range. LoRa<sup>®</sup> je fyzická vrstva nebo také radiová modulace, využívaná pro vytvoření komunikačního spojení na velkou vzdálenost (až 40 km), je navržena a patentovaná firmou Semtech Corporation, která se stará i o výrobu čipů. LoRa<sup>®</sup> modulace je derivátem CSS (Chirp Spread Spectrum) modulace. Tato modulace využívá techniku rozprostřeného spektra signálu, který je odolný vůči rušivému úzkopásmovému šumu, pomocí širokopásmových lineárních kmitočtově modulovaných kmitů (chirpů).

Mnoho stávajících bezdrátových komunikačních systémů používá FSK modulaci signálu jako fyzickou vrstvu, tato modulace je velmi efektivní a i při nízkém vysílacím výkonu lze dosáhnout spolehlivého přenosu dat. LoRa<sup>®</sup> modulace si však stejně jako FSK modulace zachovává vysokou efektivitu i při nízkém vysílacím výkonu, ale zároveň výrazně zvyšuje dosažitelnou komunikační vzdálenost [3].



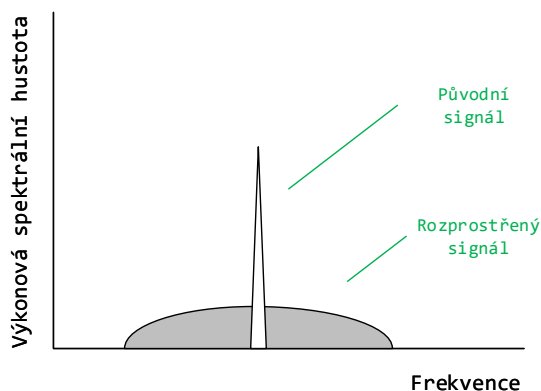
### 2.1.1 Chirp Spread Spectrum (CSS) modulace

Chirp je zkratka pro „Compressed High Intensity Radar Pulse“, neboli komprimovaný vysoce intenzivní radarový pulz běžně využívaný v radaru a sonaru (viz obr. 2.2). Chirp signál má konstantní amplitudu, u kterého se mění frekvence spojitě v průběhu času. Pokud se frekvence mění od nejnižší po nejvyšší, nazývá se „up-chirp“. Pokud se frekvence chirpu mění v opačném směru, analogicky se nazývá „down-chirp“ [4].



Obr. 2.2: Průběh chirp signálu [5].

CSS modulace se již několik desítek let využívá ve vojenské a vesmírné komunikaci právě díky velkému dosahu a vysoké robustnosti vůči rušení. LoRa® je první nízkonákladovou implementací pro komerční využití [3].



Obr. 2.3: Technika rozprostření signálu u DSSS modulace [7].

Tato modulace využívá k přenosu informace celou šířku kanálu, čímž se přenášený signál stává robustní vůči kanálovému šumu. Díky využití celé šířky kanálu je

signál odolný vůči efektu vícecestného úniku (multi-path fading) i při velmi nízkém výkonu. Nicméně, rozdíl oproti DSSS (direct-sequence spread spectrum) nebo FHSS (frequency-hopping spread spectrum) je v tom, že CSS modulace nepřidává do přenášeného signálu pseudo-náhodné elementy, pro rozpoznání signálu od kanálového šumu, namísto toho spoléhá na lineární povahu chirp pulzů. Navíc je CSS modulace odolná vůči Dopplerovu jevu, který je typický u mobilních radiových aplikací [6].

### 2.1.2 LoRa<sup>®</sup> - modulace

Jak již bylo zmíněno, LoRa<sup>®</sup> modulace vychází z CSS modulace, vznikla za účelem zajištění fázové kontinuity mezi jednotlivými symboly chirpů v preambuli paketu na fyzické vrstvě, což umožňuje jednodušší a přesnější časování a synchronizaci frekvence, bez potřeby nákladných komponent pro generování přesných hodin v koncovém LoRa zařízení.

Technologie využívá rozprostírací techniku, která každý symbol zakóduje do delší sekvence bitů (chipů), přičemž dochází ke snížení poměru signálu vůči šumu a interferencím (signal-to-noise-plus-interference ratio). Šířka rozprostíracího kódu je rovna  $2^{SF}$ , kde SF je volitelný parametr, takzvaný rozprostírací faktor (spreading factor). To v podstatě znamená, kolika chipy (u LoRa<sup>®</sup> modulace chirp = chip) je reprezentován jeden symbol. Hodnota SF je volitelná v rozsahu 7–12, což umožňuje proměnlivě měnit datovou rychlost, kterou je přímo ovlivněna propustnost, dosah, robustnost spojení a spotřeba energie [8].

Tab. 2.1: LoRa<sup>®</sup> datové rychlosti, doby přenosu a faktory rozprostření [9][10].

Datová rychlost (DR)	Faktor rozprostření (SF)	Chipy/symbol	SNR limit	Doba přenosu (10B paket) [ms]	Přenosová rychlost [b/s]
5	7	128	-7,5	56	5470
4	8	256	-10,0	103	3125
3	9	512	-12,5	205	1760
2	10	1024	-15,0	371	980
1	11	2048	-17,5	741	440
0	12	4096	-20,0	1483	250

Dalším konfigurovatelným parametrem LoRa<sup>®</sup> je šířka kanálu (BW), která může být pouze 125 kHz, 250 kHz a nebo 500 kHz. Tato hodnota je volena podle frekvenčního a regionálního plánu protokolu LoRaWAN<sup>™</sup>. *Informace o šířkách kanálu a kódových schématech byly převzaty z dokumentu [4].*

Pro samoopravnou detekci chyby přijatého signálu v přijímači je použito Hammingovo kódování, které spadá do skupiny FEC (Forward Error Correction) kódů.

Jedná se o lineární blokový kód jednoduchého na implementaci. Délka kódu, který nese informaci, je nastavena na 4 bity a délka kódového slova je nastavitelný parametr v rozsahu 5–8 bitů. LoRa<sup>®</sup> nabízí volbu faktorů chybového kódování (CR) 4/5, 4/6, 4/7 a 4/8.

Tab. 2.2: Detekce chyby a opravné schopnosti LoRa<sup>®</sup> [4].

Kódový faktor	Korekce chyb [b]	Detekce chyb [b]
4/5	0	0
4/6	0	1
4/7	1	2
4/8	1	3

Podle tab. 2.2, je korekce chyby prováděná pouze kódovým faktorem 4/7 a 4/8. Kódový faktor 4/8 oproti 4/7 není lepší v korekci chyby, ale pouze ve schopnosti detekce více chyb. Kódový faktor 4/5 nepřináší žádné vylepšení oproti nepoužití kódování a kódový faktor 4/6 nedokáže opravit žádnou chybu, pouze umožňuje detekci chyby. Pokud je vyžadována opravdová schopnost korekce chyby, je zapotřebí použít kódový faktor minimálně 4/7. Nicméně použití kódového faktoru 4/7 zvětšuje velikost payloadu (datového obsahu) o 75 % oproti nepoužití kódování. LoRa<sup>®</sup> modulace tedy nabízí nastavitelnost schémata korekce chyby, které zlepšuje robustnost přenášeného signálu. Datový tok lze vypočítat podle rovnice [11]:

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times \frac{4}{4 + CR} \quad [b/s] \quad (2.1)$$

### 2.1.3 Prahová citlivost přijímače

Šířka kanálu a použitý faktor rozptřeni ovlivňují prahovou citlivost přijímače, při které může být zpráva úspěšně doručena. Z tab. 2.3 vyplývá, že nejvyšší citlivosti přijímače lze dosáhnout při šířce kanálu 125 kHz a faktoru rozptřeni s hodnotou 12.

Tab. 2.3: Prahová citlivost Semtech SX1276 čipů [12].

BW	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
125 kHz	-123 dB	-126 dB	-129 dB	-132 dB	-133 dB	-136 dB
250 kHz	-120 dB	-123 dB	-125 dB	-128 dB	-130 dB	-133 dB
500 kHz	-116 dB	-119 dB	-122 dB	-125 dB	-128 dB	-130 dB

Kmitočty využívané pro LoRa<sup>®</sup> komunikaci jsou pouze v ISM pásmu. Rozsahy těchto bezlicenčních pásem se však na každém kontinentu liší. Ve Spojených státech může být LoRa<sup>®</sup> síť provozována v rozsahu 902–928 MHz a v Evropě 863–870 MHz. K dispozici jsou také pásma 433 MHz a 169 MHz. Zařízení však ještě musí dodržovat restriktce v podobě duty-cycle a omezení výkonu podle lokálních regulací. O těchto omezeních rozhoduje vláda. Takzvaný duty-cycle (pracovní cyklus) udává zlomek času, respektive procentuální poměr, během kterého může zařízení vysílat [8].

## 2.1.4 LoRa<sup>®</sup> - fyzický rámec

Přestože LoRa<sup>®</sup> radio může být použito k přenosu libovolného obsahu rámců, radiové čipy společnosti Semtech mají formát fyzických rámců pevně definován a specifikován. V případě LoRa PHY, tedy fyzické vrstvy, existují dva typy rámců, jeden je definovaný pro uplink a druhý pro downlink zprávy. Uplink zprávy jsou posílány z koncových zařízení skrze jednu nebo více bran do síťového serveru. Formát uplink zprávy je na obr. 2.4. Každá downlink zpráva je poslána síťovým serverem, skrze jednu bránu, pouze jedinému koncovému zařízení (pokud nejde o multicast zprávu). Rozdíl mezi uplink a downlink formátem je pouze v tom, že uplink formát obsahuje volitelnou cycklickou kontrolu redundance (*CRC*). Šířka pásma a faktor rozprostření jsou během přenosu jednoho rámce neměnné [10].

Tab. 2.4: Formát rámce LoRa<sup>®</sup> uplink PHY zprávy [10].

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC
----------	------	----------	------------	-----

LoRa<sup>®</sup> rámec začíná preambulí. Délka preamble se může napříč regiony měnit. V Evropě však LoRa<sup>®</sup> protokol používá pro synchronizaci 8 stejných symbolů s hodnotou 0x34 (up-chirpy). Elementy *PHDR*, *PHDR\_CRC* a *CRC* jsou zpracovávány přímo radiovým čipem. LoRa<sup>®</sup> je proprietární a tak podrobnější informace o *PHDR* a *PHDR\_CRC* nejsou blíže specifikovány. Maximální velikost payloadu je 255 bajtů [10].

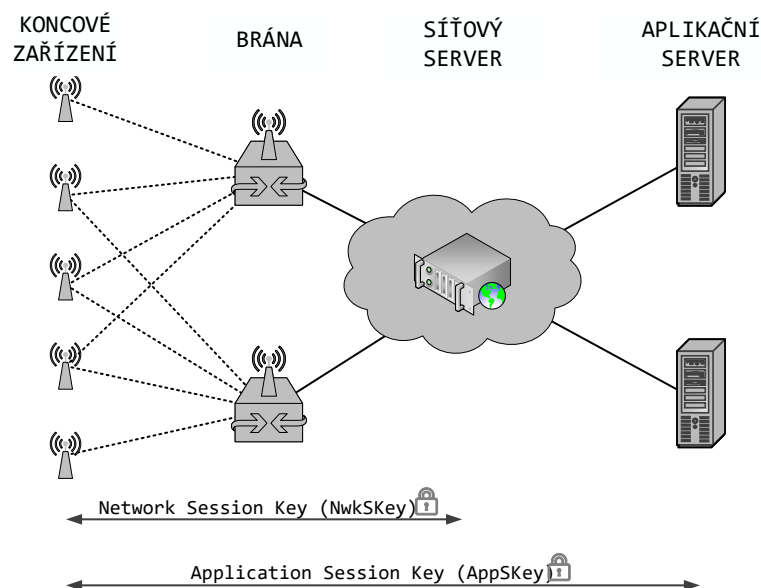
## 2.2 LoRaWAN<sup>™</sup> komunikační protokol

LoRaWAN<sup>™</sup> poskytuje mechanismus řízení přístupu ke sdílenému médiu (MAC), umožňuje tak koncovým zařízením komunikovat s bránou za použití LoRa<sup>®</sup> modulační. Jeho využití je hlavně v senzorových sítích, kde senzory komunikují se serverem s nízkou datovou rychlostí a relativně vysokými latencemi (jedna zpráva v intervalu od několika minut až dní). Zatímco je LoRaWAN<sup>™</sup> modulace proprietární, LoRaWAN<sup>™</sup> protokol je otevřený standard, který vyvíjí LoRa Alliance.

## 2.2.1 Komponenty LoRaWAN™ síť

Tato podsekcce čerpá z článku *Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios* [8]. LoRaWAN™ specifikace definuje 3 základní prvky sítě: koncové zařízení, brány (základnové stanice) a síťový server.

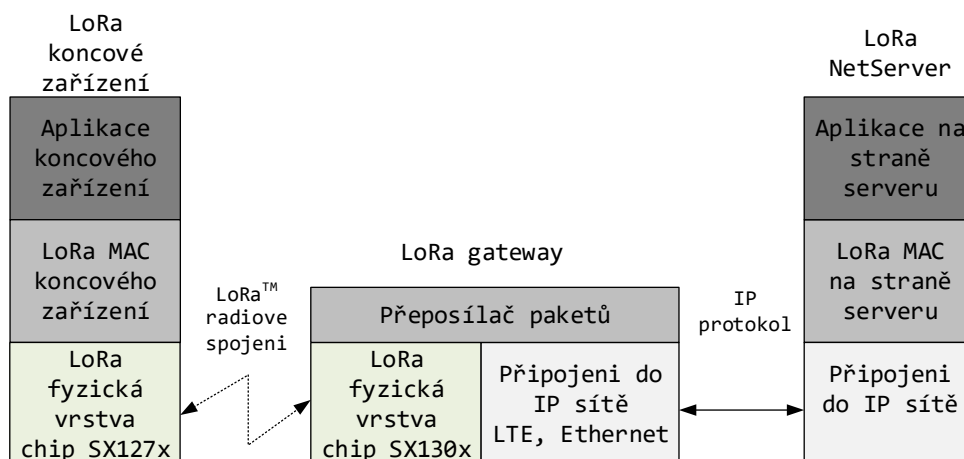
- **Koncové zařízení:** Energeticky úsporné zařízení, které komunikuje s bránou.
- **Brána:** Prostředník, který předává pakety z koncových zařízení do síťového serveru skrze páteří IP síť umožňující vyšší propustnost (např. Ethernet nebo LTE). Síť se skládá z několika bran, které mohou přijmout stejný paket a poslat jej na server.
- **Síťový server (NetServer):** Zodpovědný za dekodování a filtraci duplikátních paketů, přijatých skrze brány z koncových zařízení a generování paketů, které mají být doručeny zpět do koncových zřízení.



Obr. 2.4: Topologie LoRaWAN™ sítě [3].

LoRaWAN™ síť neumožňuje koncovým zařízením komunikovat přímo mezi sebou. Pakety mohou být přenášeny pouze mezi koncovým zařízením, NetServerem a zpět. Pokud je vyžadována komunikace mezi koncovými zařízeními, musí přenášená data putovat přes NetServer. Koncová zařízení v síti LoRaWAN™ nejsou přidružena přímo ke konkrétní bráně, jako je tomu u klasických celulárních sítí. Místo toho jsou data přenášená z jednoho uzlu, typicky přijímána několika bránami. Ke každému přijatému paketu z koncového zařízení brána přidá informace (kvalita příjmu, čas, atd.) a odešle do cloudu na NetServer. Brány slouží jednoduše jako most mezi radiovou a IP sítí a jsou pro koncové zařízení transparentní, zařízení je tedy připojeno

k NetServeru. Veškerá inteligence je ponechána také na NetServeru, který řídí celou síť, filtruje redundantní pakety, provádí bezpečnostní kontroly, vybírá vhodnou bránu pro odeslání odpovědi a zpětných paketů (pokud nějaké jsou), řídí adaptivní datarate (ADR). Topologie LoRaWAN<sup>TM</sup> sítě je typicky hvězda hvězd, viz obr. 2.4.



Obr. 2.5: Architektura LoRaWAN<sup>TM</sup> protokolu [8].

Takto navržená architektura výrazně zjednodušuje správu přístupu k síti pro koncová zařízení, neboť tuto funkci obstarává NetServer. Navíc se koncová zařízení mohou volně pohybovat napříč buňkami, aniž by generovaly další signalizační provoz v síti. Zvýšený počet bran, které obsluhují koncové zařízení, zvyšuje spolehlivost spojení zařízení s NetServerem, což je velmi důležité pro kritické aplikace.

Pokud je koncový uzel mobilní, nebo se pohybuje, není zapotřebí se starat o handover z brány na další bránu, což je kritická funkce umožňující sledování pohybu koncových zařízení - velmi přínosná funkce v IoT. Názorný vrstvý model LoRaWAN<sup>TM</sup> protokolu viz obr. 2.5.

### 2.2.2 Životnost baterie

Tento protokol využívá metodu přístupu k médiu typu Aloha. V síti mesh nebo celulární síti se musí zařízení probouzet kvůli synchronizaci se sítí. Tato synchronizace spotřebovává energii a snižuje životnost baterie. Komunikace v LoRaWAN<sup>TM</sup> síti probíhá asynchronně, koncová zařízení komunikují pouze pokud mají data k odeslání, ať už je odeslání událostmi generované nebo periodicky plánované [3].

### 2.2.3 Kapacita sítě

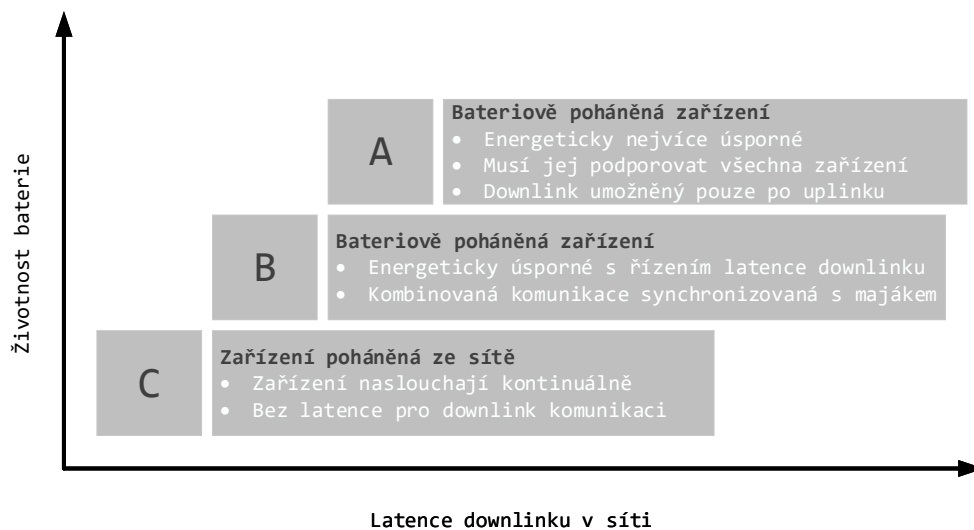
Aby mohla LoRaWAN™ síť spolehlivě fungovat, musí být brány schopny obsloužit tisíce zařízení. Pro docílení paralelního příjmu paketů z koncových zařízení, se využívá vícekanálových bran a funkce ADR (Adaptive Data Rate). Kritickými faktory, které ovlivňují kapacitu sítě, je počet využitelných kanálů, datová rychlost (doba přenosu), délka payloadu a četnost zpráv. Vzhledem k tomu, že LoRa® využívá rozprostřené spektrum, jsou signály při použití různých rozprostíracích faktorů (SF) vůči sobě ortogonální. Při změně SF se mění i efektivní rychlost přenosu dat. Brána dokáže přijímat současně na jednom kanálu zprávy s různou datovou rychlostí. Pokud je koncové zařízení v místě s vysokou úrovní signálu, je zbytečné přenášet data nízkou datovou rychlostí a blokovat tak kanál delší dobu, než je potřeba (viz tab. 2.1). Zvýšením datové rychlosti (snížením SF) je zkrácena doba přenosu dat, čímž je uvolněn kanál pro potencionální přenos dat jiným koncovým zařízením. Pro optimalizaci životnosti baterie se využívá funkce adaptivní datové rychlosti (ADR), kdy dochází k přepínání datové rychlosti koncového zařízení podle kvality spojení. Aby tato funkce mohla fungovat, je vyžadováno obousměrné spojení. Tyto funkce umožňují škálovatelnost LoRaWAN™ sítě a připojení stovek až tisíců zařízení na jednu bránu. Nová síť může být nasazena s minimální infrastrukturou a se zvyšujícími potřebami na kapacitu sítě, lze síť rozšířit o další brány a umožnit zvýšení datové rychlosti koncových zařízení [3].

### 2.2.4 Kategorie zařízení

Každé koncové zařízení má využití v různých aplikacích a jsou na něj kladeny různé požadavky. Pro optimalizaci různých profilů aplikací definuje LoRaWAN™ 3 kategorie zařízení (viz obr. 2.6) [3]:

- **Zařízení třídy A:** Zařízení této třídy plánují přenos dat na základě vlastních potřeb. Tato zařízení umožňují obousměrnou komunikaci. Po odeslání zprávy koncové zařízení otevře dvě za sebou jdoucí přijímací okna, během kterých je možné úspěšně přijmout downlink zprávu. Přenos dat ze serveru do koncového zařízení (downlink) tedy není v jiný čas možný, NetServer v tomto případě odešle downlink zprávu až po přijetí další uplink zprávy. Každé z přijímacích oken je definováno délkou, časovým offsetem a datovou rychlostí. Přestože časový offset může být změněn, je doporučené ponechat nastavení 1 s pro první okno a 2 s pro druhé okno. Příjem downlinku v koncovém zařízení je umožněn pouze po úspěšném odeslání uplink zprávy. Datová rychlost prvního přijímacího okna je vypočtená z datové rychlosti uplinku a časového offsetu přijímacího okna. Druhé okno má fixně stanovenou minimální datovou rychlost 0,3 kb/s. Proto není možné přijmout downlink bez toho, aby brána úspěšně dekodovala uplink.

Pokud je downlink zpráva v koncovém zařízení úspěšně přijata v prvním okně, druhé okno se již neotevře [13]. Zařízení této třídy mají oproti jiným třídám nejnižší spotřebu, zároveň jsou nejméně flexibilní pro downlink přenosy.



Obr. 2.6: Třídy zařízení v síti LoRaWAN™ [3].

- **Zařízení třídy B:** Nabízí obousměrnou komunikaci stejně jako zařízení třídy A, přičemž downlinková okna nejsou otevřena pouze po uplink přenosu, ale jsou plánovaná i mimo něj. Zařízení této třídy otvírají v plánovaných intervalech downlink okna. Pro otevření přijímacího okna v plánovaný čas, přijímají koncová zařízení této třídy od brány synchronizační beacon rámce. Tímto způsobem server zná čas, kdy zařízení aktivně naslouchá. Třída B je kompromisem mezi vysokými latencemi pro downlink (Třída A) a vyšší spotřebou (Třída C).
- **Zařízení třídy C:** Koncová zařízení této třídy disponují maximální délkou přijímacích oken. Zařízení nedokáže naslouchat pouze v případě, že samo vysílá. Proto mají tato zařízení nejvyšší spotřebu.

### 2.2.5 MAC příkazy

Pro správu sítě jsou mezi koncovým zařízením a NetServerem výhradně zasílány MAC příkazy. Tyto příkazy na MAC vrstvě LoRaWAN™ nejsou přístupné aplikaci, aplikačnímu serveru ani aplikaci běžící na koncovém zařízení. Jeden datový rámec může obsahovat sekvenci MAC příkazů, ať už se zasílaným payloadem nebo v samotné zprávě. Tyto příkazy mohou sloužit pro testování konektivity koncového zařízení (*LinkCheckReq*). Také mohou měnit datovou rychlost, vysílací výkon a počet opakování vysílání (*LinkADRReq*), nastavení duty-cycle (*DutyCycleReq*), změnu



parametrů přijímacích oken (*RXTimingSetupReq*, *RXParamSetupReq*) a změnu používaných kanálů (*NewChannelReq*). Jsou využívány i příkazy pro zjištění stavu baterie a kvality přijímaného signálu u koncového zařízení (*DevStatusReq*) [10].

## 2.2.6 Formát LoRaWAN™ zpráv

Tato podsekcce čerpá z *LoRaWAN™* specifikace verze 1R0 [10]. MAC zprávy protokolu jsou obsaženy v položce *MACPayload* (takzvaný datový rámec) rámce z fyzické vrstvy. Detailnější vysvětlení fyzického rámce viz sekce 2.1.4. Graficky znázorněný formát zpráv LoRaWAN™ protokolu viz obr. 2.7.

Obsah datového **PHYPayload** rámce se skládá z *MHDR*, *MACPayload* a *MIC*:

- *MHDR*: Označuje hlavičku MAC zprávy s délkou 1 bajt.
- *MACPayload*: zastupuje data z vyšší vrstvy protokolu, maximální délka je limitována použitou datovou rychlostí. V případě potřeby může být tato položka nahrazena žádostí *join-request* nebo *join-response*.
- *MIC*: označuje kontrolní součet s délkou 4 bajty.

Hlavička **MHDR** se dále skládá z položek *MType*, *RFU* a *Major*:

- *MType*: Specifikuje obsah packetu. Rozlišuje se například, zda jde o *join-request*, *confirmed message*, atd., viz LoRaWAN™ specifikace [10].
- *RFU*: Rezerováno pro budoucí použití.
- *Major*: Specifikuje verzi LoRaWAN™ protokolu. Aktuální verze je *R1*, zbylé nejsou prozatím definovány.

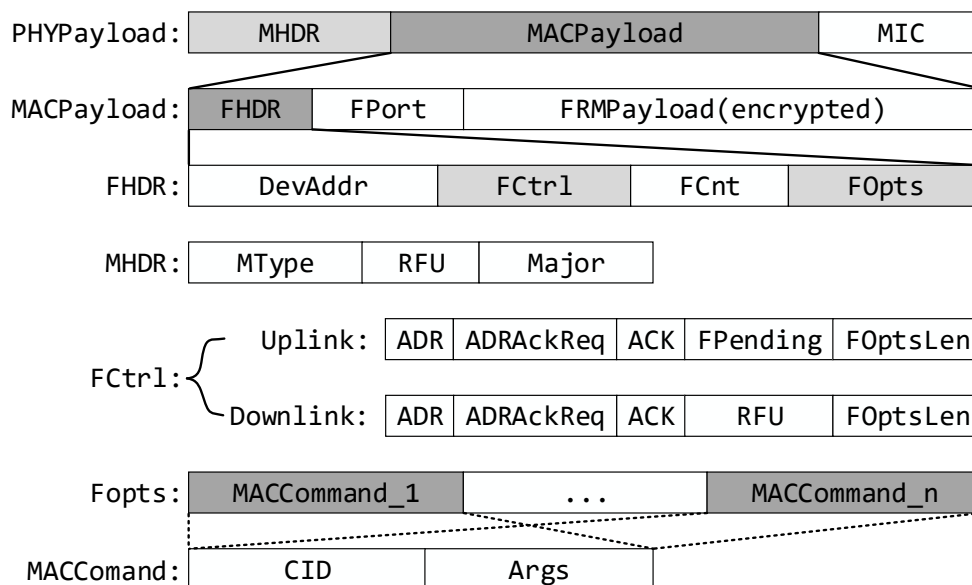
Položka **MACPayload** je sestavena z položek *FHDR*, *FPort* a *FRMPayload*:

- *FHDR*: Hlavička obsahující 4 pole: *DevAddr*, *FCtrl*, *FCnt* a *FOpts*.
- *FPort*: Je volitelná položka, která udává číslo MAC příkazu. Hodnoty 1–223 jsou již specifikovány, zbylé hodnoty 224–225 jsou rezervovány pro budoucí využití (délka 1 bajt).
- *FRMPayload*: Obsahuje samotný payload zašifrovaný pomocí AES algoritmu s délkou klíče 128 bit.

Hlavička **FHDR**, jak již bylo zmíněno, je sestavena z položek *DevAddr*, *FCtrl*, *FCnt* a *FOpts*:

- *DevAddr*: Krátká adresa koncového zařízení (délka 4 bajty).
- *FCtrl*: Obsahuje 5 položek: *ADR*, *ADRAckReq*, *ACK*, *FPending* a *FOptsLen*.
- *FCnt*: Pořadové číslo zprávy (délka 2 bajty).
- *FOpts*: Pole obsahující MAC příkazy.

Oktet **FCtrl** obsahuje již zmíněných 5 položek:



Obr. 2.7: Formát zpráv LoRaWAN™ protokolu [12].

- *ADR*: Hodnota 1 tohoto bitu značí, že je povoleno použití adaptivní datové rychlosti, neboli přepínání faktoru rozptřeni. Dále jeho přepínání bude řídit síť pomocí MAC příkazů.
- *ADRAckReq*: Žádost na odpověď od sítě, pokud nedojde odpověď, značí to ztrátu konektivity a koncové zařízení samo sníží datovou rychlost pro obnovení komunikace.
- *ACK*: Tento bit signalizuje potvrzení přijetí předchozí zprávy v případě, že bylo vyžádáno. Využívají jej potvrzované zprávy (*confirmed message*).
- *FPending*: Využívá se pouze u downlink zpráv. Brána jej odešle v případě, že je vytížená a žádá koncové zařízení o odeslání uplinkové zprávy, aby tak otevřelo nová přijímací okna.
- *FOptsLen*: Značí délku položky *FOpts*, maximální délka je 15 bajtů. V případě že je hodnota 0, pole *FOpts* neobsahuje žádná data.

Položka **MACcommand** se skládá ze dvou polí: *CID* a *Args*. Přičemž *CID* je identifikátor MAC příkazu a *Args* je volitelným argumentem příkazu. Vzhledem k tomu, že se pakety posílají pouze mezi NetServerem a senzorem, není zapotřebí uvádět cílovou adresu pro uplink pakety a zdrojovou adresu pro downlink pakety.

Minimální velikost MAC hlavičky (*MHDR*) je 13 bajtů. Celková velikost rámce je však u LoRaWAN™ protokolu limitována. Tab. 2.5 uvádí maximální velikosti payloadu při různých datových rychlostech, kde *M* značí celkovou velikost rámce, *N* pak značí maximální velikost aplikačního payloadu.

Tab. 2.5: Maximální velikosti payloadu LoRaWAN™ protokolu [10].

Datová rychlost	M [B]	N [B]
0	59	51
1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	250	222
5	250	222
6	250	222
7	250	222
8 – 15	Nedefinováno	

### 2.2.7 Adresy a klíče koncových zařízení

Zařízení v síti LoRaWAN™ využívají několik identifikátorů a klíčů. V případě identifikátorů se používají tyto [10]:

- **End-device identifier (*DevEUI*)** : Každé zařízení disponuje již z výroby tímto unikátním identifikátorem. *DevEUI* vychází z adresního rozsahu IEEE EUI-64 a je ekvivalentem MAC adresy síťového zařízení v Ethernetu.
- **End-device address (*DevAddr*)**: Dynamická adresa zařízení je 32bitový identifikátor koncového zařízení v síti. Nejvyšších 7 bitů adresy slouží jako identifikátor sítě, zbylých 25 bitů slouží jako unikátní identifikátor koncového zařízení v síti.
- **Application identifier (*AppEUI*)**: Je globální aplikační identifikátor formátu IEEE EUI-64, který jednoznačně identifikuje provozovatele aplikace, je tedy unikátní pro každou aplikaci.

Pro docílení zabezpečení a integrity dat uplinkových i downlinkových zpráv mezi koncovým zařízením a bránou; a dále pro zabránění NetServeru čtení zpráv, které jsou relevantní jiné síti, nebo infrastruktuře, používá LoRaWAN™ při výměně zpráv 2 různé šifrovací klíče *NwkSKey* a *AppSKey* (obr. 2.4). LoRaWAN™ poskytuje i podepisování paketů v rámci sítě. Pro šifrování využívá symetrické klíče, které zná pouze koncové zařízení, síťový a aplikační server. Koncová zařízení v případě *OTAA* aktivace navíc využívají aplikační klíč s názvem *AppKey*. Detailní vysvětlení využití těchto klíčů v síti [10]:

- **Network Session Key (*NwkSKey*)**: Tento klíč je unikátní pro každé koncové zařízení. Pokud jsou ve zprávě přenášeny pouze MAC příkazy, klíč šifruje celý rámec včetně hlavičky. V případě, že jsou přenášena data, je tento klíč je vyu-

žíván pro výpočet *MIC* položky, která slouží jako podpis paketu, což umožní NetServeru ověřit identitu odesílatele.

- **Application Session Key (*AppSKey*):** Tento klíč je také unikátní pro každé koncové zařízení, slouží k šifrování payloadu rámce. NetServer nemusí *AppSKey* vůbec znát, protože k dešifrování payloadu dochází až v aplikačních serverech.
- **Application Key (*AppKey*):** Klíč unikátní pro každé koncové zařízení, je přidělen provozovatelem aplikace a bývá odvozen z hlavního aplikačního klíče (root key), který je výhradně pod kontrolou provozovatele. *AppKey* je 128bitový klíč, který se využívá pro AES šifrování přenosu provozních klíčů a konfigurace v případě *OTAA* aktivace, detailnější popis viz sekce 2.2.8.

## 2.2.8 Metody připojení koncového zařízení: OTAA a ABP

Každé koncové zařízení, které chce komunikovat v LoRaWAN™ síti, musí být aktivováno. V rámci aktivace získá koncové zařízení identifikátor *DevAddr* a klíče *NwkSKey* a *AppSKey*. Tyto klíče se distribuuji dvěma různými způsoby v závislosti na použité aktivační metodě [10]:

- **Activation By Personalization (*ABP*):** Sdílené klíče *NwkSKey* a *AppSKey* a adresa *DevAddr* jsou přímo uloženy v koncovém zařízení. Zařízení po zapnutí může přímo zahájit komunikaci. *ABP* aktivace váže koncové zařízení k určité síti, proto tento typ aktivace neumožňuje roaming mezi různými síťovými poskytovateli. *ABP* aktivace v podstatě obchází *join-request* *join-accept* proceduru.
- **Over-The-Air Activation (*OTAA*):** Předtím než může zařízení komunikovat v síti, musí úspěšně provést připojovací proceduru. V rámci *join-request* zprávy se zařízení presonalizuje síti s následujícími informacemi: *DevEUI*, *AppEUI* a *AppKey*. Pokud NetServer nepovolí koncovému zařízení se připojit, na *join-request* zprávu vůbec neodpoví. Pokud ale NetServer povolí koncovému zařízení připojit se do sítě, odpoví na *join-request* zprávou *join-accept*, ve které je kromě jiného obsaženo *AppNonce*, *NetID*, *DevAddr*. Koncové zařízení si uloží *DevAddr* a zbylé informace využije k sestavení *NwkSKey* a *AppSKey* klíčů. Dále se pak zařízení chová stejně, jako by bylo aktivováno metodou *ABP*. Tato procedura je prováděna pokaždé, když koncové zařízení ztratí připojení. Tímto způsobem může zařízení roamingovat mezi různými poskytovateli LoRaWAN™ sítě.

Obě aktivační metody zajišťují vysokou úroveň zabezpečení, díky použití symetrického šifrování zpráv vyměňovaných mezi koncovým zařízením a servery. Tento mechanismus eliminuje potencionálního útočníka, aby duplikoval zařízení, nebo zneužil síť během aktivačního procesu, aniž by věděl klíče koncového zařízení [15].

## 3 Lokalizační techniky

Během posledních let provozovatelé mobilních sítí v období významné telekomunikační soutěže hledají nové a inovativní způsoby nabízení nových služeb a zvýšení zisku. Zvýšil se zájem o vývoj lokalizačních služeb pro bezdrátové komunikační systémy. Informační služby se v průběhu let rychle rozvíjely a jednou z dalších cest je přidání nového rozměru jako, jsou služby založené na určování polohy (LBS). LBS by měly splňovat požadavky na přesnost polohy stanovené konkrétní službou s co možná nejnižšími náklady a minimálním dopadem na síť a zařízení [16].

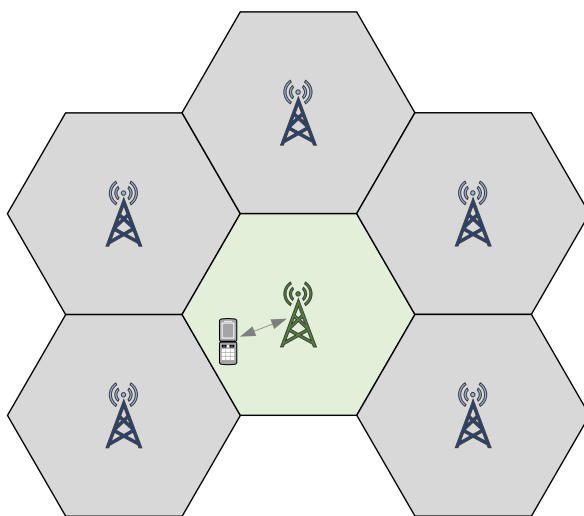
Existují různá řešení pro odhadování polohy, přičemž každá z metod závisí na různém typu pozorování dalším zařízením, jehož poloha je známá. K dispozici jsou různé lokalizační metody: GPS, TDOA, TOA, AOA, Finger Printing, RSSI atd. Metoda TDOA se potýká s problémem vícecestného šíření signálu, které zanáší chybovost měření. Případně TOA, kde se také odhadovaná poloha liší v případě přímé viditelnosti (LOS) a nepřímé viditelnosti (NLOS). Metody založené na RSS jsou méně nákladné, protože nevyžadují komplikovaný hardware a přináší přesné výsledky i v případě nepřímé viditelnosti v porovnání s ostatními metodami, přičemž chybovost zaměření kvůli vícecestnému šíření signálu setrvává. Technika zaměření pomocí úhlu příjmu signálu (AoA) přináší přesné výsledky v případě přímé viditelnosti, přesnost však klesá v případě nepřímé viditelnosti.

Přestože GPS a další GNSS systémy nabízejí lokalizační a navigační služby, které jsou nasazeny v masivním měřítku, stále existuje mnoho omezení. Tyto služby nelze provádět pokud GPS přijímač přijímá signál z méně než 4 satelitů. V podzemí, vnitřních a hustých městských prostředích je téměř nemožné zachytit GPS signál. Tento problém je eliminován pomocí GPS opakovačů, toto řešení je však finančně nákladné (stovky dolarů), přičemž může mezi těmito opakovači docházet k interferencím signálu. Kromě tohoto problému se přesnost nabízená GNSS systémy pohybuje v rozmezí od několika metrů do několika desítek metrů. Tato přesnost však nemusí být dostatečná pro určitý typ aplikací, které mohou vyžadovat přesnost v rozsahu centimetrů [17].

### 3.1 Cell identification (CI)

Je jedním z nejjednodušších metod určení polohy v systému využívajícího radiových buněk (cells). V síti GSM se využívá toho, že každý uživatel je připojen k základnové stanici (BTS). Ve své nejjednodušší formě tato technika využívá pouze *Cell ID* BTS, ke které je uživatel registrován, pokud jsou známy souřadnice BTS, je poloha zařízení určena pouze těmito souřadnicemi, kromě toho žádným jiným způsobem neodhaduje pozici mobilního zařízení. Hlavní výhodou této techniky je jednoduchost

implementace. Protože BTS nevyžadují implementaci komplikovaného algoritmu. Jakýkoliv celulární systém s fixní polohou vysílačů může využívat tuto techniku určení polohy. Nicméně hlavní nevýhodou metody čistě založené pouze na poloze buňky je vysoká nepřesnost. Přesnost závisí na velikosti buněk, může mít poloměr 250 m ve městských oblastech a až 35 km ve venkovských oblastech. Mobilní zařízení může být navíc zaregistrováno k buňce, která není v přímé blízkosti, navzdory tomu, že ostatní buňky v blízkosti jsou lepšími kandidáty. K tomu hojně dochází v případech, kde se několik buněk překrývá ve vícevrstvé struktuře [18]. Graficky znázorněná lokalizace pomocí *Cell ID* viz obr. 3.1.



Obr. 3.1: Lokalizace pomocí Cell ID [18].

Tato metoda v GSM sítích umožňuje zpřesnění díky využití parametru TA (timing advance), který je potřebný u TDMA metod, kdy je pro správnou funkci požadováno, aby signály ze zařízení přicházely ve správný čas. Čas, kdy má zařízení vysílat, se liší v závislosti na vzdálenosti zařízení od základnové stanice. Této synchronizace je dosaženo tím, že každá základnová stanice posílá připojeným zařízením *TA report* (6bit hodnota). *TA* udává dobu, o kterou musí zařízení posunout vysílání, aby se zajistilo, že zpráva dorazí ve správném časovém slotu ( $1 \text{ bit} \approx 3,69 \mu\text{s}$   $\approx 1108 \text{ m}$  celková vzdálenost (RX i TX)  $\approx 554 \text{ m}$  jedna cesta). Výsledkem je, že zařízení je nejen lokalizovatelné pomocí buňky, ke které je registrováno, ale je známa i vzdálenost od buňky s rozlišením na 554 m. Zejména u makro buněk je ve srovnání s jinými lokalizačními metodami velmi nízká přesnost. Určité vylepšení přináší využití multisektorových antén na základnové stanici, což snižuje nejednoznačnost polohy v buňce [16]. LoRaWAN<sup>TM</sup> však nepracuje s buňkami, a proto tato metoda není pro LoRaWAN<sup>TM</sup> vhodná.

## 3.2 Time of arrival (TOA)

### 3.2.1 One-way TOA

Vzdálenost mezi lokalizovaným zařízením a přijímačem může být jednoduše vypočtena z doby šíření signálu (*ToF*), což znamená, za jakou dobu přijde signál od vysílače do přijímače. V čase  $t_1$  vyšle lokalizované zařízení přijímači paket, který obsahuje časovou značku  $t_1$ . Přijímač přijme paket v čase  $t_2$ . V ideálních podmínkách, kdy jsou hodiny lokalizovaného zařízení přesně synchronizovány ke společné časové referenci, může být doba šíření vyjádřena jako [19]:

$$\tau_f = t_2 - t_1, \quad (3.1)$$

kde  $t_2$  (s) je čas příchodu signálu do přijímače a  $t_1$  (s) je čas odeslání zprávy. Přijatelná chyba ve zpoždění šíření se pohybuje v řádu nanosekund, což odpovídá vzdálenosti kratší než jeden metr. Z doby šíření se již dá vypočítat vzdálenost lokalizovaného zařízení od přijímače podle rovnice [19]:

$$d = \tau_f c, \quad (3.2)$$

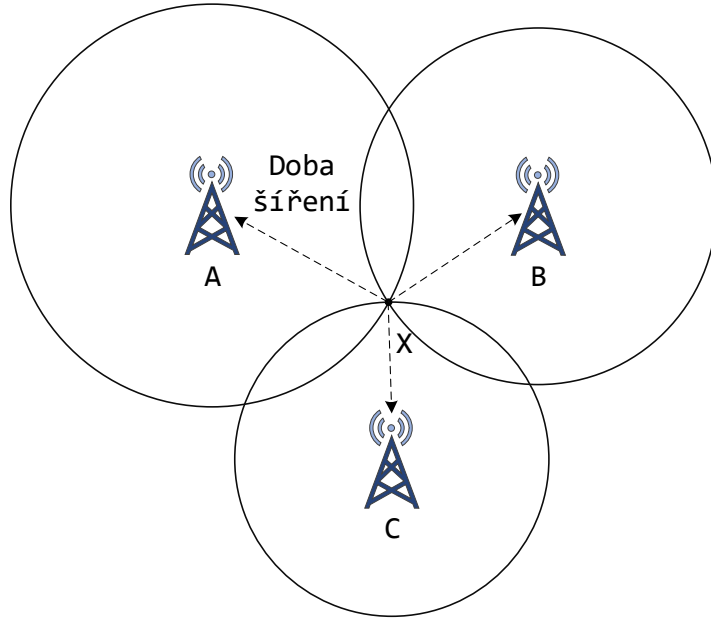
kde  $d$  (m) je vzdálenost mezi lokalizovaným zařízením a přijímačem a  $c$  je rychlost elektromagnetických vln ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s) [19]. Jak již bylo popsáno, je zapotřebí dokonalá časová synchronizace mezi lokalizovaným zařízením a přijímači, protože vzdálenost mezi nimi je počítána z časových značek startu vysílání a příjmu. I malá synchronizační chyba může způsobit vysokou nepřesnost určení polohy.

Při použití vzdálenosti jako poloměru, může být vzdálenost znázorněna kruhem individuálně okolo každého přijímače, kruh značí oblast vysoké pravděpodobnosti umístění lokalizovaného zařízení. TOA trilaterace využívá průsečíku 3 kruhů, jako je znázorněno na obr. 3.2, kde je lokalizované zařízení označeno písmenem  $X$ . Pro vyšší přesnost lokalizace je zapotřebí minimálně 3 přijímačů, i to však v určitých případech nemusí být dostačující, protože v praxi se kružnice ideálně neprotínají, využívá se tedy nasazení více přijímačů (multi-laterace) [18].

### 3.2.2 Two-way TOA

V případě two-way TOA, systém počítá okružní dobu signálu (RTT) bez společné časové reference. Základnová stanice pošle paket lokalizovanému zařízení, které odešle potvrzovací paket zpět základnové stanici s dobou zpoždění  $\tau_d$ . Doba putování signálu je v základnové stanici stanovena rovnicí [19]:

$$\tau_{RT} = 2\tau_f + \tau_d, \quad (3.3)$$



Obr. 3.2: Lokalizace pomocí TOA trilaterace [18].

kde  $t_f$  (s) je doba šíření signálu a  $t_f$  (s) je doba odezvy zařízení. Z této rovnice v případě, že  $t_d$  je znám, lze vyjádřit  $\tau_{RT}$  a vypočítat tak vzájemnou vzdálenost.

Zpoždění šíření signálu se pohybuje v řádech nanosekund (vzdálenost menší než 1 metr), avšak odezva zařízení se může pohybovat až v jednotkách mikrosekund. Zatímco two-way TOA eliminuje chybu nedokonalé časové synchronizace uzlů (jako u one-way TOA), faktory jako jsou nepřesnost hodin, nekonstantní doba odezvy zařízení a zpoždění bitovou synchronizací stále ovlivňují přesnost měření [19].

### 3.3 Time difference of arrival (TDOA)

TDOA technika je založená na měření časových rozdílů času příchodu signálu do přijímače z lokalizovaného zařízení. To znamená, že je požadováno vysoce přesné časové synchronizace přijímačů pro přesný výpočet polohy zařízení. Rozdíl mezi TDOA a TOA je v tom, že při použití metody TDOA není vyžadováno pro docílení přesného měření, aby mělo lokalizované zařízení časově synchronizovaný zdroj hodin. Soustava rovnic TDOA měření s jedním vysílačem a třemi přijímači může být zapsána jako:

$$\tau_{12} = (d_1 - d_2)/v = d_{12}/v, \quad (3.4)$$

$$\tau_{23} = (d_2 - d_3)/v = d_{23}/v, \quad (3.5)$$

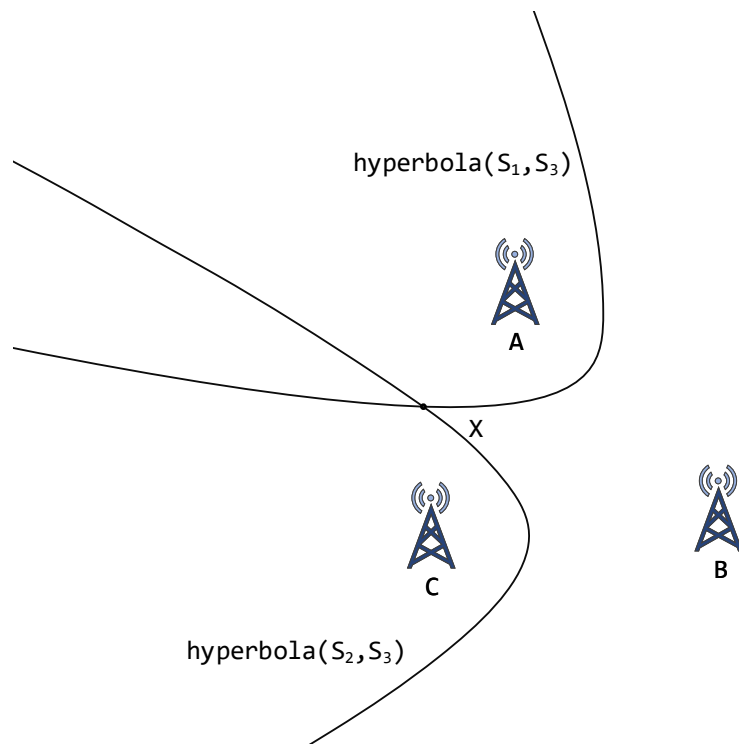


kde  $d_1$  (m),  $d_2$  (m) a  $d_3$  (m) jsou neznámé vzdálenosti mezi každým přijímačem a lokalizovaným zařízením,  $v$  (m/s) je rychlost světla a  $\tau_{ij}$  (s) je změřený časový rozdíl příchodu zprávy mezi dvěma přijímači. Vzdálenosti mohou být vypočítány podle rovnic [20]:

$$d_{12} = \sqrt{(r_{x1} - t_x)^2 + (r_{y1} - t_y)^2} - \sqrt{(r_{x2} - t_x)^2 + (r_{y2} - t_y)^2}, \quad (3.6)$$

$$d_{23} = \sqrt{(r_{x2} - t_x)^2 + (r_{y2} - t_y)^2} - \sqrt{(r_{x3} - t_x)^2 + (r_{y3} - t_y)^2}, \quad (3.7)$$

kde se za  $r_{xi}$  a  $r_{yi}$  dosazují známé souřadnice  $X$  a  $Y$  přijímačů. Neznámé souřadnice  $X$  a  $Y$  lokalizovaného zařízení pak odpovídají  $t_x$  a  $t_y$ . V případě dosazení rovnice (3.6) do rovnice (3.4) a (3.7) do (3.5), mohou být upraveny na dvě hyperbolické funkce, kde  $t_x$  závisí na  $t_y$  pro obě  $\tau$  zvlášť (viz obr. 3.3).



Obr. 3.3: Lokalizace pomocí TDOA trilaterace [18].

Minimální konfigurace vyžaduje 3 přijímače, pro zvýšení přesnosti však může být přidáno více přijímačů a využít tedy více hyperbol pro výpočet. Toto rozšíření může být nutné v případě, že výpočet s využitím hyperbolické trilaterace nabízí nejednotné řešení.

### 3.4 Received signal strenght (RSS)

Dvě výše zmíněné laterační techniky (TDOA a TOA) využívají měření časové prodlevy pro výpočet vzdálenosti lokalizovaného zařízení, pro lateraci však místo času může být využita síla signálu.

Technika lokalizace pomocí RSSI (Received Signal Strength Indication) je založená na tom, jak vzdálenost mezi vysílačem (lokalizovaným zařízením) a přijímačem ovlivňuje sílu přijatého signálu na straně přijímače. Jinými slovy, čím větší je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, tím slabší je přijatý signál. Metoda RSSI se běžně využívá v nízko nákladových systémech, jako jsou bezdrátové senzorové sítě (WSN), neboť pro svoji práci vzhledem k jiným lokalizačním metodám nevyžaduje časově přesně synchronizované hodiny ani směrové antény. Místo toho využívá teoretické nebo empirické modely útlumu signálu, které využívají RSSI pro odhad vzdálenosti. Tyto modely silně ovlivňují přesnost odhadu vzdálenosti. Běžně používaný model pro charakterizaci RSS na straně přijímače z lokalizovaného zařízení je dán rovnicí:

$$P_r(d) = P_0 - 10\gamma \log_{10} d + S, \quad (3.8)$$

kde  $P_r(d)$  (dBm) je výkon přijatého signálu,  $P_0$  (dBm) je výkon signálu přijatého na referenční vzdálenost 1 metr (záleží na vlnové délce signálu a radiové charakteristice),  $d$  (m) je vzdálenost mezi přijímačem a vysílačem, položka  $S$  (dB) představuje šum, který je obvykle modelován jako Gaussovo normální rozdělení s nulovou střední hodnotou a směrodatnou odchylkou  $\sigma_s$ . Parametr  $\gamma$  je exponent ztrát šířením (path loss exponent) s typickou hodnotou 2–6 [19].

Obecně používaná metoda pro výpočet síly signálu přijímače při daných známých veličinách, jež jsou vysílací výkon, útlum signálu, zisk antény, útlum kabelu je následující [18]:

$$RX_{PWR} = TX_{PWR} - Loss_{TX} + Gain_{TX} - PL + Gain_{RX} - Loss_{RX} \quad (3.9)$$

Z této rovnice se vychází pro výpočet vzdálenosti následovně [18]:

$$d = 10^{\frac{TX_{PWR} - RX_{PWR} - Loss_{TX} + Gain_{TX} - PL_{1meter} + s + Gain_{RX} - Loss_{RX}}{10\gamma}}, \quad (3.10)$$

kde význam výrazů ve výše zmíněných rovnicích je:

- $d$  (m) je vzdálenost,
- $RX_{PWR}$  (dB) je přijímaná síla signálu,
- $TX_{PWR}$  (dB) je výkon vysílače,
- $Loss_{TX}$  (dB) je suma všech ztrát na straně vysílače (kabely a konektory),
- $Gain_{TX}$  (dBi) je zisk antény na straně vysílače,

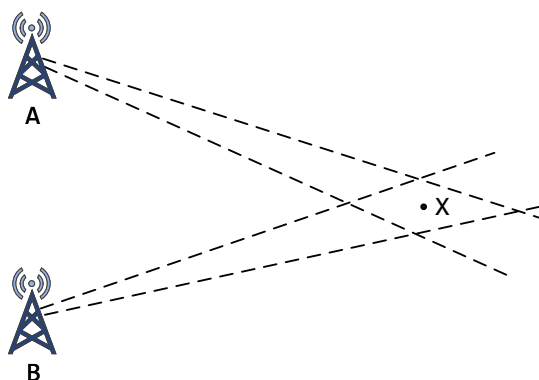
- $Gain_{RX}$  (dBi) je suma všech ztrát na straně přijímače (konektory a kabely),
- $n$  exponent ztrát šířením,
- $s$  je standardní odchylka stínění (standard deviation of shadow fading).

Podobně jako u ostatních lateračních metod, může být vypočtená vzdálenost použita jako poloměr pro vykreslení kruhu okolo přijímače. V případě využití minimálně 3 přijímačů lze zařízení lokalizovat ve 2D rovině.

Hlavní nevýhodou RSS techniky je v ta, že v prostředí plném překážek je ovlivněn útlum signálu a kvůli špatné korelaci útlumu se vzdáleností je následně snížena přesnost odhadované vzdálenosti. Proto techniky založené čistě na RSSI lateraci, které nezohledňují další útlumy a vícecestné šíření signálu v reálném prostředí, zřídka produkují přijatelné výsledky [18].

### 3.5 Angle of arrival (AOA)

Metoda určování polohy založená na sledování úhlu příjmu signálu na přijímačích. Pro odhad umístění z průsečíků dvou linek mohou být použity geometrické vztahy. Názorná ukázka AOA techniky viz obr. 3.4. Ve dvourozměrné rovině jsou pro odhad polohy zapotřebí minimálně 2 přijímače, pro zvýšení přesnosti pak 3 a více přijímačů.

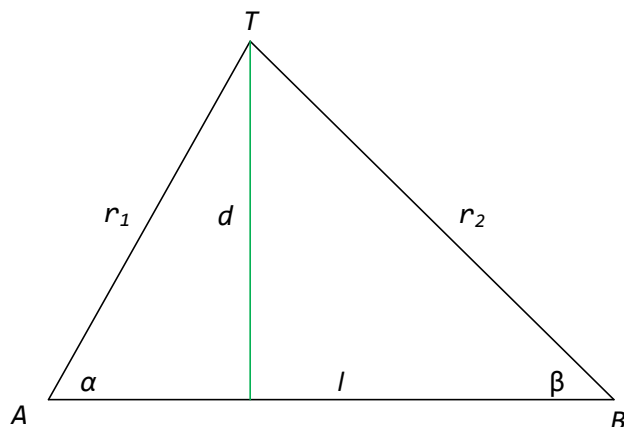


Obr. 3.4: Lokalizace pomocí AOA bilaterace [18].

Tato metoda využívá triangulaci a může být pomocí geometrických vztahů vyjádřena pomocí rovnice:

$$l = \frac{d}{\tan(\alpha)} + \frac{d}{\tan(\beta)}, \quad (3.11)$$

kde  $d$  (m) je výška lokalizovaného cíle,  $l$  (m) je vzdálenost mezi přijímači A a B,  $\alpha$  je úhel příchozího signálu k A přijímači a  $\beta$  je úhel příchozího signálu k B přijímači. Grafické znázornění viz obr. 3.5.



Obr. 3.5: AoA triangulace (jeden cíl a 2 dva přijímače) [18].

Jednotlivé vzdálenosti mezi zaměřovaným cílem a dvěma přijímači lze vypočítat pomocí rovnic:

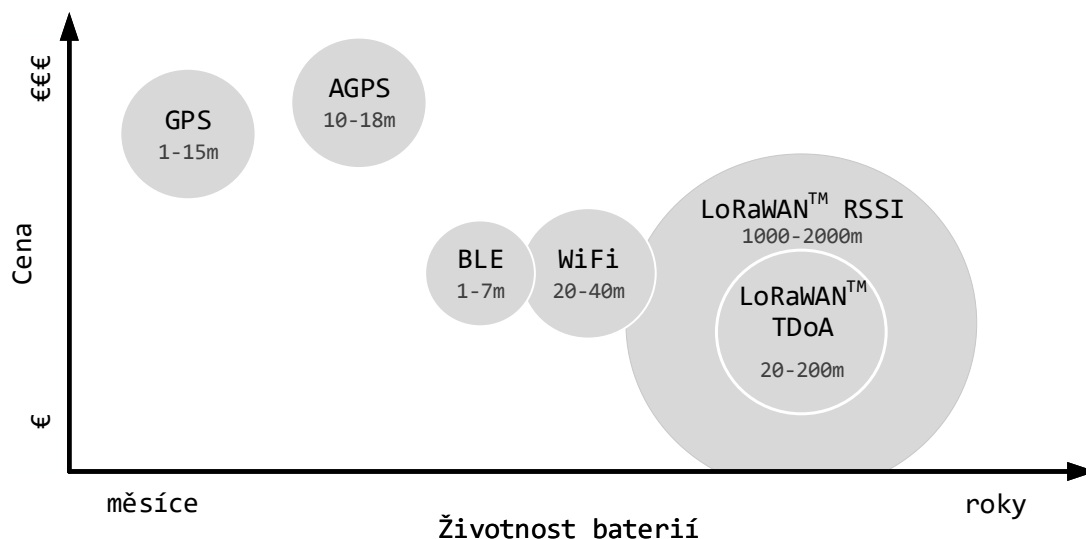
$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{d}{\sin \alpha}, \\ r_2 &= \frac{d}{\sin \beta}, \end{aligned} \tag{3.12}$$

kde  $r_1$  (m) je vzdálenost mezi přijímačem  $A$  a lokalizovaným cílem a  $r_2$  (m) je vzdálenost mezi přijímačem  $B$  a lokalizovaným cílem. Poloha cíle je pak dána průsečíkem těchto dvou vzdáleností. Tento příklad slouží pro názorné vysvětlení, v praxi je však vhodné využití více přijímačů.

Pokud je mezi lokalizovaným přístrojem a přijímači přímá viditelnost (LOS), mechanicky pohyblivé směrové antény rozmístěné na přijímačích se nastaví do úhlu, ve kterém má přijímaný signál největší sílu. Úhel nastavení směru antén lze přímo použít ve výše zmíněných rovnicích 3.11 a 3.12 [18].

## 3.6 Lokalizace v LoRaWAN™ síti

LoRaWAN™ umožňuje využití dvou základních technik lokalizace. Pro hrubý odhad určení polohy lze využít sílu signálu (RSSI) a pro přesnější určení polohy pak TDOA. TDOA metoda je právě vhodná pro nasazení do aplikací vyžadující lokalizaci bateriově poháněných aplikací za nízkou cenu. Přesnost této metody se pohybuje v rozsahu od 20 m do stovek metrů. Vyšší přesnost lze docílit ve venkovských oblastech s přímou viditelností na přijímací brány. S doporučeným rozprostřením těchto bran. Problémy vícecestného šíření spojené s městskými oblastmi pak snižují přesnost této techniky lokalizace. Obecně platí, že se přesnost lokalizace s hustotou



Obr. 3.6: Lokalizace v síti LoRaWAN™ [21].

nasazených brán zvyšuje. Porovnání lokalizačních technik podle ceny, energetické náročnosti a přesnosti viz obr. 3.6. Nejvyšší efektivity je dosaženo u koncových zařízení vyžadujících nepříliš časté učení polohy. Tato zařízení jsou typicky statická, nebo se nepohybují často. V případě potřeby častějšího určení polohy, vysílá zařízení více rámců, což má za následek vyšší spotřebu zařízení.

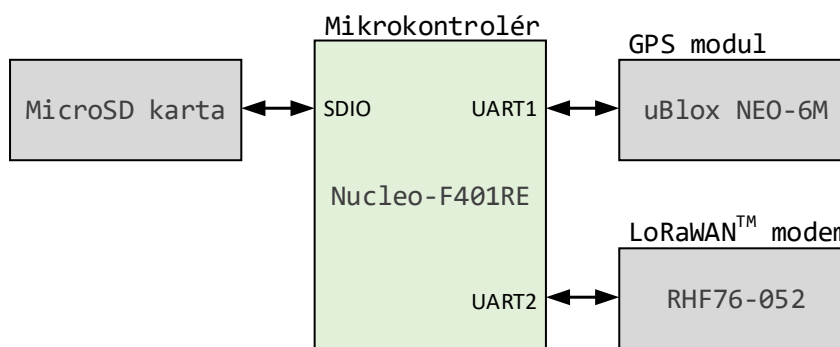
Zařízení mohou být lokalizovaná, pokud přenášený rámec zachytí minimálně 3 brány. Rámec nemusí být nikterak specifický pro lokalizace, přenášený payload tedy může přenášet klasická data aplikace. Několik bran zachytí stejný rámec přenášený z koncového zařízení, lokalizace je určena pomocí multilaterační techniky.

**Postup určení polohy** Lokalizace v LoRaWAN™ síti nevyžaduje žádné hardwarové rozšíření na straně koncového zařízení. Brány však vyžadují přesnou časovou synchronizaci, které je docíleno pomocí GPS. Každému přijatému rámcu z koncového zařízení přiřadí brána časovou značku (timestamp). Tato informace je odeslána do NetServeru jako součást metadat rámce, který mimo jiné obsahuje úroveň signálu a poměr signálu k šumu. NetServer přijme data od brán, které zachytily rámec vyslaný z koncového zařízení, seskupí všechna metadata včetně časové značky a zadá požadavek geolokačnímu solveru. Funkcí geolokačního solveru je provést výpočet polohy koncového zařízení na základě rozdílů časových značek párů brán. Časový rozdíl udává vzdálenost zařízení od jedné brány oproti druhé bráně z páru. V případě, že je znám časový rozdíl mezi dvěma bránami, může být vykreslena hyperbola, na které leží vysílací zařízení. Každý pár tvoří hyperbolu, poloha koncového zařízení je pak určena průsečíkem hyperbol [21].

## 4 Výsledky studentské práce

### 4.1 Bezdrátový senzor pro testování lokalizace

Za účelem testování lokalizace v LoRaWAN™, bylo nutné zkonstruovat bezdrátový senzor, jehož úkolem je odesílání aktuální polohy získané z GPS modemu skrze tuto síť. Zjednodušené blokové schéma s názvy použitých modulů viz obr. 4.1. Princip



Obr. 4.1: Blokové schéma bezdrátového testovacího senzoru.

fungování programu je následující. Nejprve dojde k inicializaci periférií nezbytných pro běh mikrokontroleru, v nekonečné smyčce už pak dochází k rutinnímu příjmu NMEA zpráv z GPS modulu, uložení na SD kartu a odeslání skrze LoRaWAN™ modul. Tělo funkce `main()` vypadá následovně:

```
int main(void)
{
    HAL_Init();
    bsp_init(); // Initialize the board

    while (1) {
        bsp_GPS_info_handle(); // Receive GPS data
        bsp_store_data((char*)buf); // Store into SD card
        bsp_LORA_send((char*) buf); // LoRa send
        bsp_MCU_sleep(45000); // 45 seconds sleep
    }
}
```

GPS modul uBlox NEO-6M komunikuje s mikrokontrolerem skrze sběrnici UART. Kde podle výchozí konfigurace lze na výstupu TX pinu modemu zachytávat každou vteřinu zprávy v následujícím formátu.

```
$GPDTM,W72,,0.00,S,0.01,W,-2.8,W84*4F
$GPGBS,235458.00,1.4,1.3,3.1,03,, -21.4,3.8*5B
$GPGLL,4717.11364,N,00833.91565,E,092321.00,A,A*60
```

```
$GPGGA,095952.00,4911.32681,N,01636.33219,E,1,04,6.33,514.2,M,42.3,M,,*50
```

Pro získání informací o poloze zařízení, je důležitý řádek nesoucí identifikační označení \$GPGGA. Z něj lze podle následující struktury vyčíst zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku, nadmořskou výšku, přesnost zaměření, počet satelitů a čas v UTC formátu [25].

```
$GPGGA,hhmmss.ss,Latitude,N,Longitude,E,FS,NoSV,HDOP,msl,m,Altref,m,DiffAge,DiffStation*cs
```

Funkce `bsp_GPS_info_handle()` se stará o příjem těchto dat a selekci informací nesoucích údaje o poloze, tedy zeměpisná šířka, zeměpisná délka a pro informaci i čas. Výsledný textový řetězec, který je odeslán skrze LoRaWAN™, vypadá následovně:

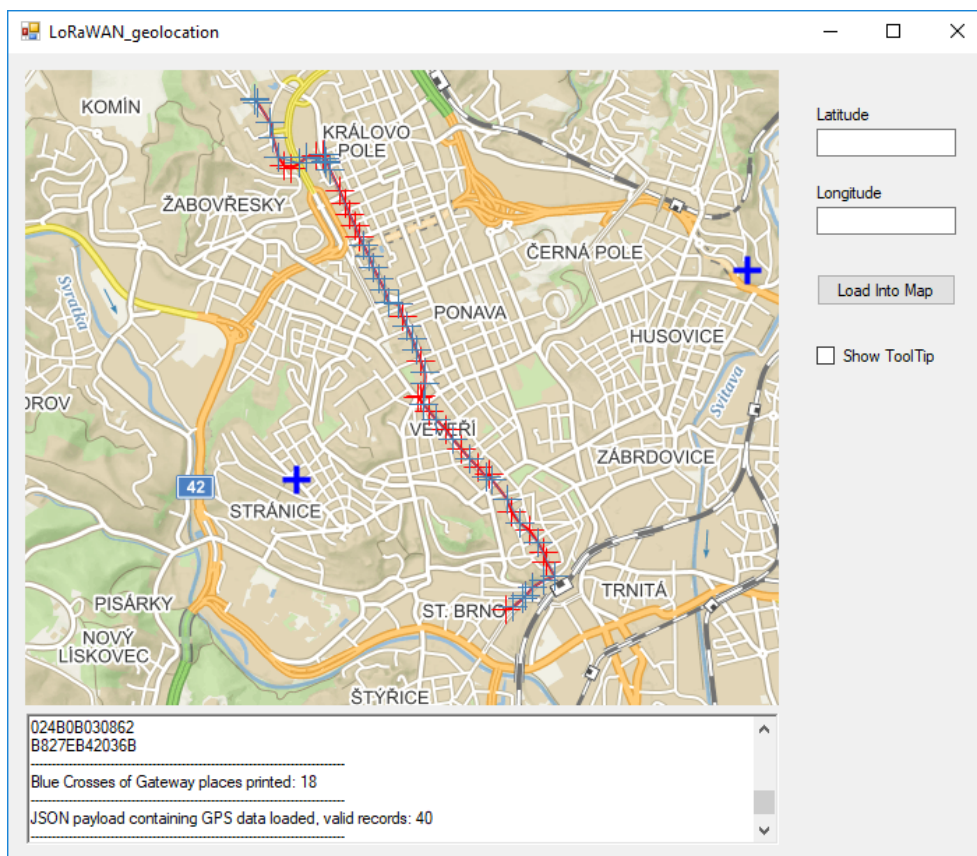
```
09:32:23;49.3983300;15.9832800.
```

Pro umožnění lokalizace v LoRaWAN™ síti, není vyžadována žádná úprava hardware, a proto byl pro radiovou komunikaci zvolen standardní LoRaWAN™ modul od firmy RisingHF, který nese označení RHF76-052. Řídící prvek, tedy mikrokontrolér STM32F401, byl zvolen z důvodu výkonu a také periferie umožňující komunikaci s SD kartou. Tento mikrokontrolér disponuje pamětí RAM s velikostí 96 KB a pamětí FLASH s velikostí 512 KB, pro urychlení vývoje bylo využito přístupu k periferiím pomocí HAL funkcí. Bylo využito vývojového kitu Nucleo-F401RE, veškeré piny mikrokontroléru jsou tedy vyvedeny skrze pinovou lištu, díky čemuž následný vývoj programu pro senzor sestavený na nepájivém poli proběhl velmi rychle. Zvolený akumulátor typu 18650 s jmenovitým napětím 3,7 V a kapacitou 2200 mAh, který by měl bez problémů vydržet několikahodinové měření v terénu. Jelikož testovací senzor není předmětem této diplomové práce, nebyla brána optimalizace programu ani potřeba senzoru v potaz.

## 4.2 Program pro vizualizaci polohy senzoru

Další nezbytnou částí diplomové práce je vizualizace dat. Pro tento účel byl napsán program na platformě .NET v jazyce C#. Cílem tohoto programu je vizualizace ať už referenční polohy (naměřené pomocí GPS) nebo vypočtené polohy (pomocí lokalizačních algoritmů). Program s názvem `LoRaWAN_gelocation` využívá WPF knihovnu, která umožňuje využití grafického rozhraní.

Pomocí prvku `GMap.NET` je využit mapový podklad, do kterého jsou následně vykresleny údaje o poloze lokalizovaného zařízení, viz obr. 4.2.



Obr. 4.2: Náhled lokalizační aplikace.

Příklad kódu, který slouží k vykreslení dvou bodů a jejich spojení na mapě. Jednoduše tak lze vykreslit historii pohybu zaznamenaného na SD kartě, nebo vypočítanou polohu senzoru.

```
// Create object from coordinates
PointLatLng A = new PointLatLng(49.38221, 15.97714);
PointLatLng B = new PointLatLng(49.41103, 15.95144);
// Draw markers
Pen blackPen = new Pen(Brushes.Black, 6);
draw.DrawMarker(A, blackPen);
draw.DrawMarker(B, blackPen);
// Draw line in between
draw.DrawLine(A, B, new Color.Chocolate, 1);
```

Postup funkce programu je následující. Při startu program načte z definované složky textový soubor s příponou .csv, ve kterém jsou záznamy z LoRa serveru uloženy po řádcích ve formátu JSON. Tyto data lze zachytávat pomocí MQTT listeneru, který naslouchá aplikačnímu LoRaWAN™ serveru. Jeden JSON záznam náleží jednomu rámcí odeslanému ze senzoru využívající LoRaWAN™ síť. Pro geolokaci



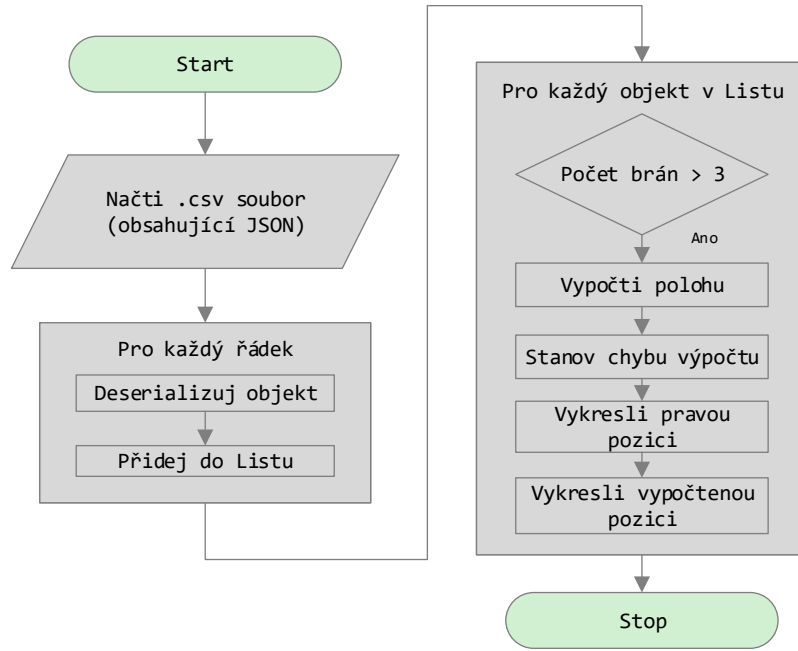
senzoru je nejdůležitější pole s názvem **gws** obsahující informace o každé bráně, která vysílaný rámec zachytila. Pro výpočet polohy senzoru s využitím TDOA metody je důležité, aby pole **gws** obsahovalo informace alespoň ze 3 brán (viz podsekcce 3.3), dále **time** a GPS souřadnice brán (**lat**, **lon**). Poslední důležitá položka s názvem **data** obsahuje aplikační data (payload). V případě senzoru určeného pro testování lokalizace (viz podsekcce 4.1), jsou v payloadu přenášeny informace z GPS: čas, zeměpisná šířka a zeměpisná délka. Náhled jednoho JSON záznamu z **csv** souboru:

```
{ "seqno": 47980716, "EUI": "47BAC86800290021",
  "ts": 1541699072281, "fcnt": 63, "port": 8,
  "freq": 867500000, "toa": 2138,
  "dr": "SF12 BW125 4/5", "ack": false,
  "gws": [
    { "rssi": -98, "snr": -8.5, "ts": 1541699072281,
      "time": "2018-11-08T17:44:32.247226498Z",
      "gweui": "024B08FFFF0500A9", "lat": 49.1988101,
      "lon": 16.5795896 },
    { ... Zaznamy z dalsich bran ... } ],
  "bat": 255,
  "data": "7:44:29;4911.31230;01636.37525"
}.
```

Program pro převedení každého JSON záznamu na objekt, se kterým lze nadále pracovat, jej uloží do listu (datové struktury). V následujícím cyklu program postupně prochází položky v listu a pro každý objekt, který nese informace minimálně ze 3 brán a zároveň obsahuje validní data payload (tedy souřadnice aktuální polohy z GPS modulu), je proveden výpočet polohy, viz obr. 4.3. Jak lze výše pozorovat, souřadnice jsou uloženy ve formátu geodetických (zeměpisných) souřadnic, které jsou udávány ve stupních. Pro výpočet je však nutné tyto souřadnice převést do univerzálního transversálního Mercatorova systému souřadnic (UTM). Podle kterých je zemský povrch rozdělen na 60 poledníkových zón, kde pro každou zónu je střed souřadnic tvořen průsečíkem středového poledníku zóny s rovníkem. Od tohoto středu je měřená vzdálenost v metrech, využívá osy X a Y [24]. Pro účely převodu byla v programu využita třída **GeoUTMConverter.cs** napsaná panem Charlesem L. Taylorem.

### 4.2.1 Lokalizační algoritmus

Algoritmus pro výpočet polohy vysílače byl převzat ze zdrojů [22][23]. Podle rozboru v teoretické části ze sekce 3.6, byla pro lokalizaci zvolena metoda TDOA. Analytické lineární řešení, které hledá průsečíky hyperbol vyjádřené pomocí soustav rovnic



Obr. 4.3: Vývojový diagram programu pro vizualizaci

zapsané v maticovém tvaru. Pro 2D lokalizaci jsou vyžadovány minimálně 3 brány. Pro výpočet musí být jedna z brán vybrána a označena jako 0. brána, ta je pak logicky umístěna do středobodu souřadnic, všechny výpočty jsou dále vztaženy k této bráně. Pro vyřešení rovnic se jako reference pro linearizaci použije 1. brána. Avšak nezáleží na tom, která brána je pro linearizaci zvolena.

$N$  : Počet brán

$S_i(x_i, y_i)$  : Souřadnice brány ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ )

$S(x, y)$  : Souřadnice lokalizovaného senzoru

$d_i$  : Vzdálenost mezi  $i$ . bránou a senzorem

$d_{0i}$  : Vzdálenost mezi 0. bránou a  $i$ . bránou

$\tau_{0i}$  : Rozdíl časů příchodu rámce do  $i$ . a 0. brány ( $i = 1, 2 \dots N-1$ )

$c$  : Rychlost světla

$$\tau_{0i} = \frac{1}{c} |S - S_0| - \frac{1}{c} |S - S_i| = \frac{1}{c} (d_0 - d_i) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} d_{0i} &= \tau_{0i} \cdot c = d_0 - d_i \\ \Rightarrow d_i &= d_0 - d_{0i} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned}
d_0^2 - d_i^2 &= |S - S_0|^2 - |S - S_i|^2 \\
&= (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - (x - x_i)^2 - (y - y_0)^2 \\
&= x_0^2 - x_i^2 + 2x(x_i - x_0) + y_0^2 - y_i^2 + 2y(y_i - y_0)
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Při nahrazení  $d_i$  za  $d_0 - d_{0i}$  vypadá rovnice následovně:

$$\begin{aligned}
d_0^2 - (d_0 - d_{0i})^2 &= x_0^2 - x_i^2 + 2x(x_i - x_0) + y_0^2 - y_i^2 + 2y(y_i - y_0) \\
2d_0 \cdot d_{0i} - d_{0i}^2 &= x_0^2 - x_i^2 + 2x(x_i - x_0) + y_0^2 - y_i^2 + 2y(y_i - y_0)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

Při následném přeskupení výrazů:

$$x(x_0 - x_i) + y(y_0 - y_i) + d_{0i} \cdot d_0 = \frac{1}{2}(x_0^2 - x_i^2 + y_0^2 - y_i^2 + d_{0i}^2) \tag{4.5}$$

Soustava lineárních rovnic může být přepsána do maticového tvaru následovně ( $i = 1, 2, 3 \dots N-1$ ):

$$\begin{bmatrix} x_0 - x_1 & y_0 - y_1 & d_{01} \\ x_0 - x_2 & y_0 - y_2 & d_{02} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_0 - x_n & y_0 - y_n & d_{0n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(x_0^2 - x_1^2 + y_0^2 - y_1^2 + d_{01}^2) \\ \frac{1}{2}(x_0^2 - x_2^2 + y_0^2 - y_2^2 + d_{02}^2) \\ \dots \\ \frac{1}{2}(x_0^2 - x_n^2 + y_0^2 - y_n^2 + d_{0n}^2) \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

Tímto vznikla obyčejná rovnice  $A\vec{x} = \vec{b}$ . Matice  $A$  a vektor  $\vec{b}$  jsou známi. Problém vyžaduje učení  $\vec{x}$  při kterém  $A\vec{x} \approx \vec{b}$  minimalizuje reziduální sumu čtverců. Tento proces se nazývá regrese metodou nejmenších čtverců.

Chyba označená jako  $\varepsilon$  je vyjádřena následovně:

$$\varepsilon(\vec{x}) = A\vec{x} - \vec{b} \tag{4.7}$$

Minimalizování čtverců odchylek funkce  $\|A\vec{x} - \vec{b}\|^2$  derivací podle  $\vec{x}$  a položením rovnice rovnou nule:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \vec{x}} \|A\vec{x} - \vec{b}\|^2 &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial \vec{x}} [(A\vec{x} - \vec{b})^T (A\vec{x} - \vec{b})] &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial \vec{x}} [\vec{x}^T A^T A\vec{x} - 2\vec{x}^T A^T \vec{b} + \vec{b}^T \vec{b}] &= 0 \\
2A^T A\vec{x} - 2A^T \vec{b} &= 0 \\
\Rightarrow \vec{x} &= (A^T A)^{-1} A^T \vec{b}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Vektor  $\vec{x}$  je tedy řešením. Pokud nejsou brány umístěny rovnoměrně, pak matice  $A$  je regulární a tedy i invertibilní. Toto řešení je jedním ze základních. Ve většině případů jsou hodnoty vektoru  $\vec{x}$  brány jako počáteční hodnoty pro pokročilejší komplexní postupy.

## 4.3 Testování LoRaWAN™ sítí ČRa a VUT

V rámci zadání diplomové práce je cílem otestovat LoRaWAN™ síť VUT v Brně a ČRa. První zmíněná síť však sestává pouze ze dvou brán a nemůže být hlouběji otestovaná, neboť jak již bylo uvedeno v kap. 3, pro metodu TDOA i RSSI je minimálně potřeba 3 přijímačů (brán). Zbývá tedy pouze síť Českých radiokomunikací.

### 4.3.1 Síť Českých Radiokomunikací

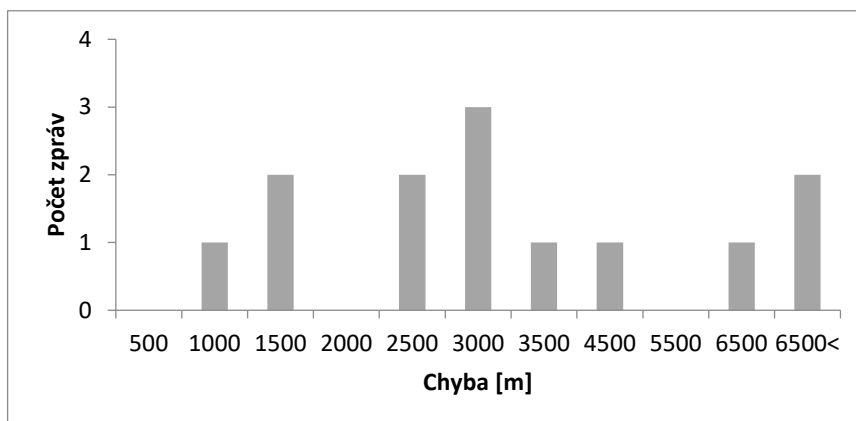
Společnost České radiokomunikace provozuje v oblasti Brna a jeho okolí celkem 18 brán. Využívá přitom brány od společností Kerlink (V1.0 a V1.5) a RisingHF (RHF2S008). Brány od společnosti RisingHF nedisponují GPS přijímačem, který slouží pro časovou synchronizaci, zdroj času je zde použit NTP server dostupný z internetu. Brány od společnosti Kerlink však GPS synchronizaci mají. Z tohoto důvodu lze pro aplikaci lokalizačního algoritmu využít pouze brány od společnosti Kerlink.



Obr. 4.4: Pozice brán Českých radiokomunikací (pouze Brno).

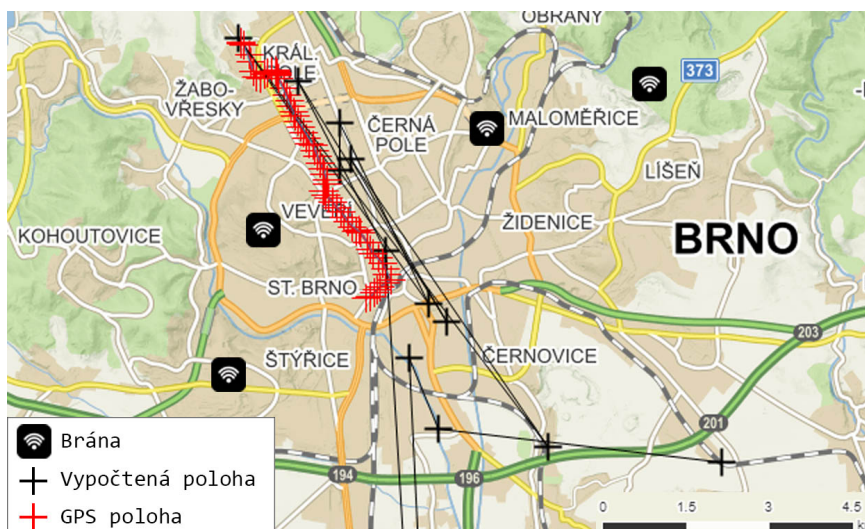
Na obr. 4.4, lze vidět pozice brán ČRa, červené kříže označují brány Kerlink a modré kříže brány RisingHF. Z obrázku je tedy patrné, že pro lokalizaci v oblasti Brno jsou použitelné pouze 4 brány. Jelikož se jedná o městskou lokalitu s hustou zástavbou, podmínky pro testování lokalizace jsou značně ztíženy. Navzdory těmto informacím bylo provedeno měření. Z přijatých 72 zpráv pouze 13 zpráv, splňovalo

zmíněná kritéria a byla pro ně určena poloha. Histogram přesnosti výpočtu polohy v lokalitě Brno viz obr. 4.5.



Obr. 4.5: Histogram přesnosti výpočtu pozice senzoru.

Vypočtená data byla vykreslena do mapy, pro možnost bližšího prozkoumání, viz obr. 4.6. Bylo zjištěno, že pokud jsou při zvoleném algoritmu výpočtu polohy použity data pouze ze 3 brán, vzniká chyba v řádu tisíců kilometrů. Proto bylo nutné vybrat pouze ty záznamy, které obsahují informace minimálně ze 4 brán.



Obr. 4.6: Výsledky lokalizace v síti Českých radiokomunikací.

Během vývoje programu pro výpočet polohy byly provedeny výpočty ze všech záznamů, které splňují kritérium tedy informace minimálně ze 4 brán. A bylo zjištěno, že časová synchronizace brán značky RisingHF je nedostačující, neboť časové značky z těchto brán zanášely chybu v řádu od jednotek milisekund výše, z čehož vzhledem

k rychlosti šíření elektromagnetických vln, vzniká chyba odhadu polohy v řádu stovek až tisíců kilometrů. Z tohoto důvodu bylo dále nutné omezit selekci přijatých dat pouze na brány značky Kerlink. Z výsledků lze konstatovat, že síť Českých radiokomunikací je schopna lokalizace avšak je nutné splnit výše zmíněné podmínky, které jsou pro správnou funkci lokalizace zásadní, ve většině případů však nastává problém je splnit. Podle vyjádření Českých radiokomunikací, již dochází k nasazování brán, které by měly poskytovat velmi přesné časové značky.

Počet relevantních zpráv, pro které by mohly být aplikovány pokročilejší metody zpřesňování odhadu polohy byl vyhodnocen jako nedostačující. Vzhledem k dosaženým výsledkům bylo přistoupeno k plánu postavení vlastní LoRaWAN™ sítě, na které mohou být možnosti lokalizace podrobeny detailnějšímu zkoumání.

## 4.4 Vlastní řešení

Tato sekce pojednává o kompletní přípravě testovací sítě, jmenovitě úprava a osazení hardware, instalace software, potřebné úpravy nastavení a v poslední řadě testování. Na závěr jsou zmíněny limity této technologie.

### 4.4.1 Dostupnost hardware na trhu

Aktuálně (2018) se na trhu pohybuje několik výrobců LoRaWAN™ brán. Přičemž je lze rozdělit do dvou kategorií. Do první kategorie spadají brány, navržené podle referenčního designu V1 od společnosti Semtech, která si technologii LoRa® patentovala. Tyto brány poskytují rozlišení časových značek příchodu rámce s přesností 1  $\mu$ s. Pouze některé brány však obsahují zabudovaný GPS přijímač. Ceny kompletních řešení i se zabudovaným GPS přijímačem začínají od 1000 \$ (Kerlink, Gemtech, Link Labs).

Do druhé kategorie spadají brány navržené podle referenčního designu V2. Tato verze oficiálně přináší možnost lokalizace vysílacích zařízení, skrze vyšší přesnost časových značek příchodu rámců (jednotky nanosekund). Vysoké přesnosti je dosaženo skrze rozšíření o integrované obvody FPGA a DSP a nezbytné GPS, odemknutí této funkce však vyžaduje zakoupení speciálního klíče. Referenční design V2 však není veřejně přístupný. Přičemž ceny kompletních řešení startují od 2000 \$ (Kerlink iBTS a Cisco IXM-LPWA-800-16-K9).

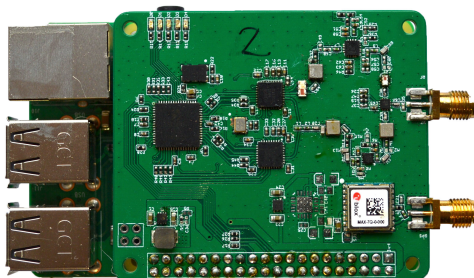
Poslední možností je zakoupení samotného koncentrátoru, který obstarává pouze radiovou část, tedy funkce vysílání a příjmu LoRa® rámců a komunikuje skrze SPI sběrnici s řídicím prvkem např. v podobě jednodeskového počítače Raspberry Pi. Zařízení je na trhu hned několik např. IMST iC880A-SPI a RAK833, u kterých se cena pohybuje okolo 150 \$, avšak tyto zařízení nedisponují GPS přijímačem.

### 4.4.2 Úprava hardware

Z důvodu vysokých finančních nároku bylo přistoupeno k vytvoření vlastních testovacích brán sestavených z koncentrátoru a počítače. Vzhledem k dostupnosti veřejných informací se však jedná pouze o zařízení spadající do kategorie referenčního designu V1. Veškeré aktuálně dostupné brány, využívají integrovaný obvod Semtech SX1301/SX1308 operující v základním pásmu a obvody SX1257 / SX1257 / SX1258 zajišťující LoRa<sup>®</sup> / FSK modulaci. Rozdíly mezi bránami různých výrobců jsou tedy hlavně v designu plošného spoje, který ovlivňuje kvalitu přijímaného/vysílaného signálu. Vzhledem k dostupnosti open-source návrhu, nastává možnost zakoupit zhotovený koncentrátor např. IMST iC880A-SPI a doplnit jej o GPS modul, nebo si koncentrátor kompletně zhotovit sám. Bylo přistoupeno k vyzkoušení obou možností.

#### Osazení desky koncentrátoru

Návrh plošného spoje koncentrátoru byl převzat z open-source projektu od Willa Whanga [26]. Plošný spoj byl s využitím pájecí pasty a horkého vzduchu osazen integrovaným obvodem Semtech SX1301 (baseband) a dvěma integrovanými obvody Semtech SX1257 (Tx/Rx front-end). Dále byl osazen GPS modul uBlox Max-7Q,

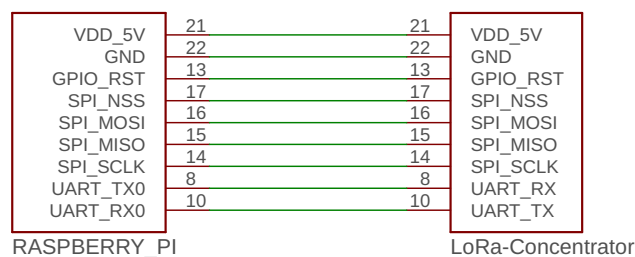


Obr. 4.7: Vytvořená vlastní brána pro Raspberry Pi.

který poskytuje časovou synchronizaci koncentrátoru. Obvodové schéma koncentrátoru viz příloha A. Tento návrh se oproti konkurenčním vyznačuje vyvedenou pinovou lištou přímo kompatibilní s konektorem pro Raspberry Pi a lze jej tak bez nutnosti redukčních desek připojit na přímo. Tento koncentrátor je schopen naslouchat na 8 kanálech, přijímat LoRa<sup>®</sup> rámce šířkou pásma až 250 kHz a činitelem rozptřeni od 7 do 12. Deska se 4 vrstvami byla vyrobená z běžného materiálu



značeného jako FR4, tedy tkaniny ze skelných vláken sycených epoxidovou pryskyřicí. Rozměry desky činí 65 x 56 mm. Schéma zapojení koncentrátoru viz 4.8.



Obr. 4.8: Schéma propojení LoRa koncentrátoru.

Tabulka 4.1 porovnává rozdíly kvality příjmu signálu pro 5 koncentrátorů, z čehož jsou 3 koncentrátory osazeny ručně a 2 strojově osazené koncentrátory, které produkuje společnost IMST. Nemalý vliv může mít také výběr vhodných pasivních i aktivních komponent. Měření probíhalo na vzdálenost 5 m, přímá viditelnost, stejná anténa. LoRa<sup>®</sup> vysílač byl nastaven na SF8 a 868 MHz, na každý přijímač bylo odesláno 150 vzorků. Z výsledků je patrné, že ručně konstruované brány nemají z pohledu úrovně přijímaného signálu horší vlastnosti.

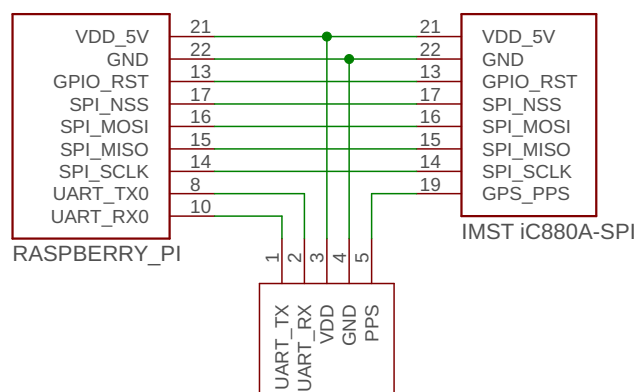
Tab. 4.1: Porovnání průměrné úrovně kvality (ze 150 vzorků) příjmu LoRa<sup>®</sup> koncentrátorů.

Název	RSSI [dBm]
1. IMST C880A-SPI	-36.47
2. IMST C880A-SPI	-42.57
1. koncentrátor	-36.63
2. koncentrátor	-35.28
3. koncentrátor	-36.48

### Úprava pro IMST iC880A-SPI

Koncentrátor od společnosti IMST, má již vyhrazené neosazené místo pro GPS modul. Z důvodu zachování záručních podmínek a také z důvodu nutnosti vybrat modul, který by na neosazené místo pasoval, bylo nakonec přistoupeno k možnosti úpravy redukční desky rozšířením o GPS modul vlastní volby (uBlox MAX-7Q), vzhledem k tomu, že vývody koncentrátoru umožňují připojení GPS modulu externě, nebyla vyžadována žádná manipulace s koncentrátozem. Schéma zapojení koncentrátoru a redukční desky viz 4.9.



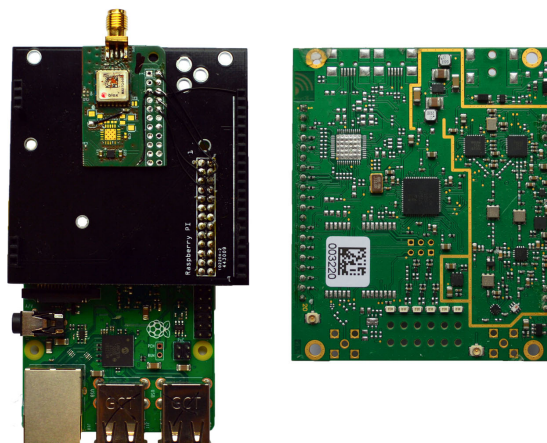


Obr. 4.9: Schéma propojení IMST iC880A-SPI koncentrátoru.

Stačilo tedy na kontakty již zakoupené redukční desky připojit vodiče GPS modulu. PPS signál (Pulse Per Second), tedy signál s frekvencí 1 Hz, také zvaný TIMEPULSE, poskytuje pulzy přesně synchronizované podle UTC času (Coordinated Universal Time). Této časové reference je využíváno v integrovaném obvodu SX1301, kde slouží jako zdroj synchronizace pro případnou eliminaci driftu vnitřních hodin. Tímto je zaručena vysoká přesnost přidělených časových razítek příchozím LoRa<sup>®</sup> rámcům. Udávaná přesnost časové reference uBlox MAX-7Q se pohybuje v rozmezí od 30 do 100 ns [27]. Samotné časové razítko však pro stanovení času nestačí, neboť tento údaj nese pouze informaci o tom, kolik  $\mu s$  uběhlo od startu běhu koncentrátoru. O přepočítání času se stará software v nadřazeném prvku (tedy Raspberry Pi). Časovou referenci nadřazenému prvku také poskytuje GPS modul, ale skrze sériové rozhraní (UART), kde je přenášeno datum i čas ve standardu NMEA zpráv. Výsledky provedené úpravy viz obr. 4.10.

### 4.4.3 Příprava OS pro Raspberry Pi

Operačních systémů dostupných pro Raspberry Pi je k dispozici mnoho (Windows 10 ARM64, Raspbian, Ubuntu, Kali linux, CentOS, ..). Vzhledem k nízkému výkonu zařízení a poměrně minimálních požadavcích na operační systém byl zvolen OS Raspbian (vycházející z distribuce Debian), neboť je oficiálně podporován jako primární operační systém pro Raspberry Pi, a tedy je optimalizován pro ARM procesory. Na místo klasického HDD, zavádí Raspberry Pi operační systém z paměťové karty. Z oficiálních stránek <https://www.raspberrypi.org> lze stáhnout aktuální verzi operačního systému. Na Windows lze pomocí programu Win32DiskImager, provést přípravu SD karty ze staženého obrazového (.img) souboru. Celý proces byl testován a provozován na verzi s názvem 2018-11-13-raspbian-stretch-full. Po



Obr. 4.10: Redukční deska s GPS (vlevo) pro koncentrátor IMST (vpravo).

zasunutí připravené SD karty do Raspberry Pi a následném připojení napájení, dojde k zavedení operačního systému. Při prvním spuštění se po načtení systému na obrazovce objeví dialogové okno průvodce, který uživatele postupně žádá o doplnění informací, jako jsou regionální nastavení (jazyk a klávesnice), uživatelské heslo, Wi-Fi síť a jako poslední možnost nabízí aktualizaci software, kterou je vhodné provést. Aktualizaci software lze vynutit i z příkazové řádky. Pomocí následujících příkazů dojde postupně k aktualizaci katalogu balíčků, druhý příkaz se postará o provedení aktualizace a poslední příkaz vymaže automaticky nainstalované balíčky, které nejsou nadále vyžadovány.

```
sudo apt-get update
sudo apt-get dist-upgrade
sudo apt-get autoremove
```

Pro možnost vzdálené správy je vhodné doinstalovat program **VNC Server**, který umožní skrze IP adresu připojení vzdálené plochy, odpadá tedy nutnost mít připojené periferie k Raspberry Pi. Veškerá konfigurace, kromě té prvotní, kdy je nutné **VNC Server** nastavit, už nadále může probíhat pouze vzdáleně. Stažení programu VNC lze vyvolat následujícím způsobem.

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install realvnc-vnc-server
```

Před použitím vzdálené plochy je nejprve nutné přejít do nastavení Raspberry Pi a povolit připojení skrze **VNC server**. Dále nutné v tomto nastavení také povolit rozhraní SPI a UART.

```
sudo raspi-config
```

V nabídce nastavení zvolit položku **Interfacing Options**. V této podnabídce povolit následující:

```
VNC > Enabled ,  
SPI > Yes ,  
Serial > No > Yes .
```

V posledním kroku stačí už jen zjistit IP adresu Raspberry Pi, skrze kterou se pomocí programu **VNC Viewer** na vzdáleném zařízení může kdokoliv po zadání uživatelského jména a hesla připojit.

```
ifconfig
```

Připojení ke vzdálené ploše však funguje pouze v rámci lokální sítě, nebo z internetu, avšak pouze pokud je IP adresa Raspberry Pi veřejná.

#### 4.4.4 Packet-forwarder na Raspberry Pi

V případě připraveného operačního systému a povoleném rozhraní UART a SPI, lze pokračovat stažením, konfigurací a kompilací programu, který řídí koncentrátor a stará se o přeposílání paketů skrze IP protokol na server. V prvním kroku je vhodné vytvořit pracovní adresář, do kterého budou staženy všechny potřebné soubory.

```
cd /home/pi  
mkdir lora
```

Do tohoto adresáře dále vytvořit kopii git repozitářů **lora\_gateway** a **packet\_forwarder**. **Lora\_gateway** se stará o nízko-úrovňovou komunikaci s koncentrátorem skrze SPI rozhraní. Nad ním je postavený **packet\_forwarder**, který pracuje na linkové vrstvě (tedy LoRaWAN™) a komunikuje se serverem.

```
cd ~/lora  
git clone https://github.com/Lora-net/lora_gateway  
git clone https://github.com/Lora-net/packet_forwarder
```

Výše zmíněnými příkazy byla vytvořena pouze kopie zdrojového kódu, před spuštěním je tedy nutné se postupně přesunout do obou adresářů a zavolat program, který se postará o sestavení spustitelných souborů.

```
sudo make all
```

Projektové soubory jsou však ve výchozím nastavení, prvním sestavením tak lze ověřit, že kompilátor nenašel v kódu souborů žádné chyby. A dále ověřit, zda dokáže

Raspberry Pi komunikovat s koncentrátorem, pro tento případ lze spustit program, který se nachází v adresáři `lora_gateway/util_spi_stress`.

```
cd ~/lora/lora_gateway/util_spi_stress
./util_spi_stress
```

Následně lze na výstupu konzole pozorovat, zda dochází k úspěšnému přenosu dat. Další program, který slouží především k testování, nese název `util_pkt_logger`. Tento program aktivuje naslouchání na koncentrátoru a program následně ukládá přijaté pakety do `csv` souboru, lze tedy s pomocí bezdrátového LoRaWAN™ koncového zařízení ověřit funkčnost.

## Úprava konfigurace

V případě Raspberry Pi 3B+ náhodně docházelo k neúspěšnému navázání komunikace s koncentrátorem. Problém se nacházel v automatickém přetaktování procesoru a tím pádem neúnosně vysoké frekvence SPI rozhraní. Tento problém lze vyřešit omezením maximální frekvence procesoru.

```
sudo nano /boot/config.txt
```

kde se nachází položka `arm_freq`, pokud se před položkou nachází znak `#`, znamená to, že položka je zakomentovaná a není brána v potaz, proto je nutné zakomentování odstranit a nastavit bezpečnou frekvenci např. 500 MHz.

```
arm_freq = 500
```

Po provedení restartu, by mělo Raspberry Pi navázat komunikaci s koncentrátorem bez problémů. V následujících krocích je důležité správně nastavit konfigurační soubory programu. Úprava souboru:

```
~/lora/packet_forwarder/lora_pkt_fwd/global_conf.json.
```

Změna proběhla pouze v poli `gateway_conf`, zde je nastavena IP adresa serveru, porty a také časové intervaly, pro získání času a polohy z GPS je nutné doplnit informace o sériovém komunikačním portu. Ostatní parametry byly ponechány beze změny.

```
"gateway_conf": {
  "gateway_ID": "AA555A0000000000",
  "server_address": "127.0.0.1" /*"localhost"*/,
  "serv_port_up": 1700,
  "serv_port_down": 1700,
  /* Your network parametres */
  "keepalive_interval": 10,
```

```

    "stat_interval": 30,
    "push_timeout_ms": 100,
    /* forward only valid packets */
    "forward_crc_valid": true,
    "forward_crc_error": false,
    "forward_crc_disabled": false,
    /* GPS configuration */
    "gps_tty_path": "/dev/ttyS0",
    "fake_gps": false
}

```

Každá LoRaWAN™ brána disponuje unikátním GwID. Tento identifikátor však není vygenerován automaticky, program má ve výchozím stavu nakonfigurovanou adresu A555A0000000000. Lze však využít skriptu s názvem `update_gwid.sh`, který provede na základě MAC adresy síťové karty vygenerování nového unikátního GwID.

```

cd ~/lora/packet_forwarder/lora_pkt_fwd
sudo ./update_gwid.sh local_conf.json

```

Poslední úprava se týká formátování časové značky LoRaWAN™ paketů. Výstupní čas je totiž zaokrouhlen na celé  $\mu s$ . Přestože testované brány mají rozlišení časových značek 1  $\mu s$ , při přepočtu však vznikají i hodnoty v řádu  $ns$ , proto je vhodné upravit formátování tak, aby nedocházelo k zaokrouhlování. Zdrojový soubor se nachází v adresáři

```
~/lora/packet_forwarder/lora_pkt_fwd/src/lora_pkt_fwd.c.
```

Při vkládání parametru `pkt_utc_time.tv_nsec` ve funkci `snprintf` na řádku 1616, dochází ke zmíněnému zaokrouhlování.

```

j = snprintf((char *)(buff_up + buff_index),
    TX_BUFF_SIZE-buff_index,
    ", \"time\": \"%04i-%02i-%02iT%02i:%02i:%02i.%06liZ\"",
    (x->tm_year)+1900, (x->tm_mon)+1, x->tm_mday,
    x->tm_hour, x->tm_min, x->tm_sec,
    (pkt_utc_time.tv_nsec)/1000); /* ISO 8601 format */

```

Jde tedy o změnu z `%06liZ` na `%09liZ` a také `(pkt_utc_time.tv_nsec)/1000` na `pkt_utc_time.tv_nsec`. Porovnání záznamu časové značky před a po úpravě.

```

"time": "2019-03-23T09:36:26.801241Z"
"time": "2019-03-23T09:36:26.801241801Z"

```

Aby veškeré úpravy prošly v platnost, je nutné znovu sestavit spustitelné soubory.

```

cd ~/lora/lora_gateway
sudo make all
cd ~/lora/packet_forwarder
sudo make all

```

Při každém startu koncentrátoru je důležité jej resetovat, pro tuto funkci lze volat skript s parametrem `start/stop`. Druhý volitelný parametr udává číslo GPIO pinu, jinak bude použit výchozí pin.

```
sudo ~/lora/lora_gateway/reset_lgw.sh stop 25
sudo ~/lora/lora_gateway/reset_lgw.sh start 25
```

Aby uživatel při spouštění programu nemusel volat jednotlivé skripty, je možné si vytvořit jeden skript, který se postará o restart koncentrátoru a následně spustí program `lora_pkt_fwd`.

```
#!/bin/bash
# iC880A Reset pin is connected to RPi pin 22 (GPIO 25)
sudo /home/pi/lora/lora_gateway/reset_lgw.sh stop 25
sudo /home/pi/lora/lora_gateway/reset_lgw.sh start 25
# Renew LoRa MAC address
cd /home/pi/lora_working/packet_forwarder/lora_pkt_fwd
sudo ./update_gwid.sh local_conf.json
# Run forwarder
./lora_pkt_fwd
read
```

#### 4.4.5 LoRaWAN™ Network Server na Raspberry Pi

Po splnění následujících kroků, je možné připojit do sítě každou bránu, na které jsou zprovozněny programy `packet-forwarder` a `lora-gateway-bridge`, při úpravě konfigurace bridge na adresu LoRa severu a následném zaregistrování na webovém portálu. Vzhledem k tomu, že testování lokalizace probíhá v lokalitě, kde není možné bez dalších úprav připojit zařízení k internetu, odpadá možnost komunikace se vzdáleným serverem. Byla tedy zvolena offline metoda, kdy na každé bráně běží lokální server a přijatá data jsou ukládána na SD kartu do textového souboru. Za tímto účelem byla přichystána jedna SD karta, na které byl zprovozněn kompletní software, z této SD karty pak byly vytvořeny kopie, každá brána se tedy tváří jako samostatný celek (sít). Po provedení měření pak byla data ze všech brán shromážděna do jednoho adresáře a lokalizační program `GMAP_logger` se postaral o seskupení jednotlivých záznamů, vypočtení poloh a vykreslení do mapy. Pro otestování schopnosti lokalizace v LoRaWAN™ není důležitá komunikace v reálném čase. V případě nasazení lokalizace do reálné aplikace však důležitá je.

LoRa Server je LoRaWAN™ Network Server poskytující open-source komponenty pro stavbu LoRaWAN™ sítí. Dohromady tvoří kompletní řešení, zahrnující uživatelsky přívětivé webové prostředí a rozhraní API gRPC a REST. Komponenty lze také využít pro integraci LoRa serveru do stávající infrastruktury. Správcem

repozitáře je uživatel @brocaar. Projekt a veškerá dokumentace jsou dostupné na adrese <https://www.loraserver.io/>. Komponenty LoRa Serveru:

- **LoRa Gateway Bridge:** Služba, která transformuje obsah UDP paketů z programu packet-forwarder na JSON zprávy do MQTT protokolu.
- **LoRa Net Server:** LoRaWAN Network Server, zodpovědný za de-duplikaci a zpracování uplink rámců přijatých branami, zpracování LoRaWAN™ protokolu na MAC vrstvě a plánování downlinkových datových přenosů.
- **LoRa App Server:** A LoRaWAN Aplikační-server, zodpovědný za údržbu inventář zařízení připojených do infrastruktury, zpracování žádosti o připojení, zpracování a šifrování aplikačních dat.

Poslední využitou komponentou mimo LoRa Server je **Node-RED**, nástroj pro jednoduché grafické programování určený k propojení HW zařízení, API a online služeb.

## LoRa Gateway Bridge

lora-gateway-bridge ke své práci využívá MQTT broker, lze nainstalovat pomocí příkazové řádky.

```
sudo apt-get install mosquitto
```

Dále mohou být staženy předkompilované binární soubory programu LoRa Gateway Bridge. Aktivace repozitáře pomocí příkazů:

```
sudo apt-get install dirmngr,  
sudo apt-key adv --keyserver keyserver.ubuntu.com  
--recv-keys 1CE2AFD36DBCCA00 ,  
sudo echo "deb https://artifacts.loraserver.io/packages/  
2.x/deb stable main" |  
sudo tee /etc/apt/sources.list.d/loraserver.list  
sudo apt-get update.
```

Následujícím příkazem pak proběhne finální instalace načtených balíčků. Pro správné spuštění služby je nutné ji restartovat. lora-gateway-bridge naslouchá přichozím UDP paketům ve výchozím nastavení na portu 1700.

```
sudo apt-get install lora-gateway-bridge  
sudo systemctl restart lora-gateway-bridge
```

Podle výpisů v konzoli vyvolaných následujícím příkazem, lze pozorovat, zda program Packet-forwarder správně komunikuje s programem lora-gateway-bridge.

```
journalctl -u lora-gateway-bridge -f -n 50
```

## Podpůrné programy pro LoRa Server

V následujících krocích je popsána instalace programů požadovaných pro LoRa Server, těmi jsou PostgreSQL a Redis Server. LoRa Server uchovává data o bránách v PostgreSQL databázi. Data, která nejsou perzistentní, jsou uchovávána v Redis databázi.

```
sudo apt-get install postgresql
sudo apt-get install redis-server
```

## LoRa Net Server

Následuje vyvolání kontextu PostgreSQL skrze uživatele postgres a provedení série příkazů pro vytvoření databáze s názvem loraserver\_ns.

```
sudo -u postgres psql
-- create the loraserver_ns user
create role loraserver_ns
    with login password 'dbpassword';
-- create the loraserver_ns database
create database loraserver_ns
    with owner loraserver_ns;
-- exit the prompt
\q
```

Zda byla databáze správně vytvořena, lze ověřit příkazem, který provádí připojení ke zmíněné databázi:

```
psql -h localhost -U loraserver_ns -W loraserver_ns.
```

Aktivace repozitáře umožní stažení předkompilovaných souborů programu LoRa Net Server pomocí následujících příkazů (poslední příkaz provede instalaci):

```
sudo apt-key adv --keyserver keyserver.ubuntu.com
--recv-keys 1CE2AFD36DBCCA00
sudo echo "deb https://artifacts.loraserver.io/packages/2.x/
deb stable main" |
    sudo tee /etc/apt/sources.list.d/loraserver.list
sudo apt-get update
sudo apt-get install loraserver
```

Dále je nutné upravit nastavení konfiguračního souboru, jde o změnu údajů pro přístup do databáze. Ostatní parametry mohou být ponechány ve výchozím nastavení. Adresáři programu však prvně musí být nastavená práva pro možnost úpravy.



```
# Modify file permissions
cd /etc
sudo chmod 755 lorasever
sudo nano lorasever/lorasever.toml

# Set login parameters
dsn="postgres://lorasever_ns:dbpassword@localhost/
    lorasever_ns$sslmode=disable"
```

Aby se provedly změny nastavení, je potřeba na závěr program restartovat:

```
sudo systemctl restart lorasever.
```

## LoRa App Server

Modul `pg_trgm` poskytuje funkce a operátory pro učení podobnosti alfanumerických textů. Následuje vyvolání kontextu PostgreSQL skrze uživatele `postgres` a provedení série příkazů pro vytvoření databáze s názvem `lorasever_as` a povolení rozšíření `pg_trgm`.

```
sudo -u postgres psql
-- create the lorasever_as user
create role lorasever_as
    with login password 'dbpassword';
-- create the lorasever_as database
create database lorasever_as
    with owner lorasever_as;
-- enable the trigram extension
-- change to the LoRa App Server database
\c lorasever_as
create extension pg_trgm;
-- exit the prompt
\q
```

Zda byla databáze správně vytvořena, lze ověřit příkazem, který provádí připojení ke zmíněné databázi:

```
psql -h localhost -U lorasever_as -W lorasever_as.
```

Aktivace repozitáře umožní stažení předkompilovaných souborů programu `LoRa App Server` pomocí následujících příkazů (poslední příkaz provede instalaci):

```
sudo apt-key adv --keyserver keyserver.ubuntu.com
    --recv-keys 1CE2AFD36DBCCA00
sudo echo "deb https://artifacts.lorasever.io/packages/2.x/
    deb stable main" |
    sudo tee /etc/apt/sources.list.d/lorasever.list
```

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install lora-app-server
```

Dále je nutné upravit nastavení konfiguračního souboru, jde o změnu údajů pro přístup do databáze, ostatní parametry mohou být ponechány ve výchozím nastavení. Adresáři programu však prvně musí být nastavená práva pro možnost úpravy.

```
# Modify file permissions and open for editing
cd /etc
sudo chmod 755 lora-app-server
sudo nano lora-app-server/lora-app-server.toml

# Set login parameters
dsn="postgres://loraserver_as:dbpassword@localhost/
    loraserver_as$sslmode=disable"

# Set jwt_secret
# Generate by this command: 'openssl rand -base64 32'
jwt_secret="r7180bHeq0NUyr06+N/WqHqnKtPYfAgmk07NVuzD3io="
```

Následně je nutné uložit změny souboru, provést restart služby a z výpisu konzole ověřit, zda program LoRa App Server úspěšně komunikuje s databází.

```
sudo systemctl restart lora-app-server
sudo systemctl status lora-app-server
```

Pokud vše proběhlo v pořádku, lze skrze webový prohlížeč otevřít administraci LoRa Serveru na adrese (uživatelské jméno: admin, heslo: admin):

<http://localhost:8080/>.

## Tvorba profilů a konfigurace LoRa Serveru na webovém portálu

Při prvním spuštění LoRa Serveru, je program bez výchozích profilů, které je nutné vytvořit a nastavit. Dále je důležité nastavit položky **Network-severs** a **Applications**. Nabídka **Organizations** obsahuje již ve výchozím stavu vytvořenou organizaci s názvem **loraserver**. Postupně jsou popsány tvorby profilů pro:

- Gateway-profiles,
- Service-profiles,
- Device-profiles.

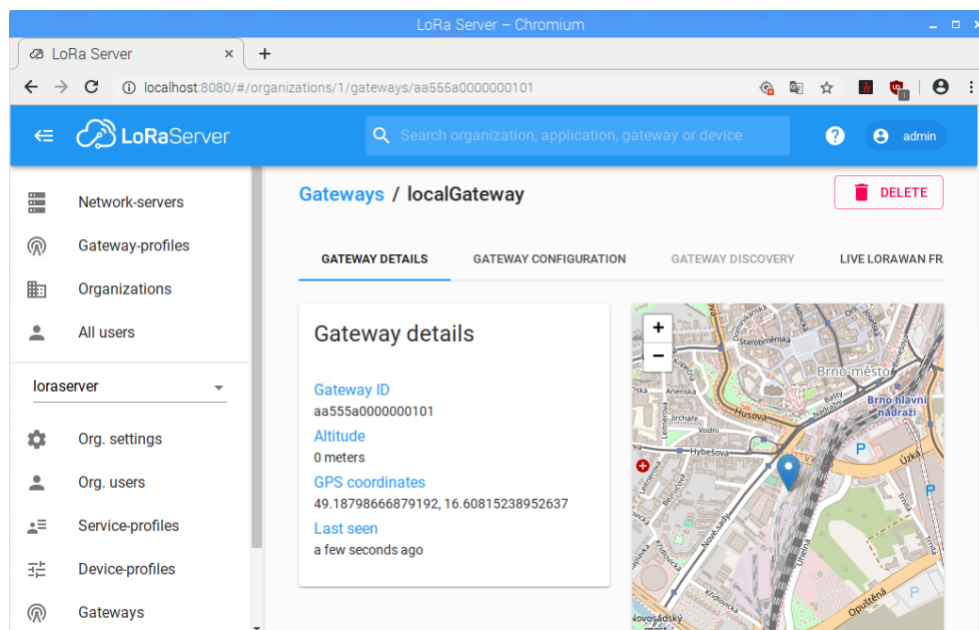
První položkou je **Network-servers**. Kde je nutné nastavit připojení k serveru pomocí tlačítka **+ADD**. Na záložce **General** vytvořit název pro Network Server (např.

*NetServer*) a zadat adresu, na které se lze k serveru připojit. Podle výchozího nastavení komunikuje Lora Net Server na adrese `localhost:8000`. Závěrem potvrdit volbou **ADD NETWORK SERVER**.

Prvním z profilů je nabídka **Gateway-profiles**, kde lze volbou tlačítka **+Create** vytvořit nový profil. Uživatel je dále vyzván pro zadání názvu profilu (např. *gatewayProfile*), zadání povolených kanálů (např. *0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7*) a výběr již vytvořeného Network Serveru (*NetServer*). Dále lze pokračovat na nabídku **Service-profiles**, kde lze také tlačítkem **+CREATE** vytvořit nový profil, zde je dále vyžadováno po uživateli zadat název profilu (např. *serviceProfile*), zatrhnout volbu **Add gateway meta-data** a potvrdit vytvoření profilu tlačítkem **CREATE SERVICE PROFILE**. Poslední z profilů je nutno vytvořit v nabídce **Device-profiles**, volbou tlačítka **+Create**, je uživatel dotázán na zadání názvu profilu (např. *deviceProfile*), volbu již vytvořeného Network Serveru (*NetServer*), výběr LoRaWAN™ MAC verze (např. *1.0.3*), výběr třídy zařízení (např. *A*) a stanovení maximálního výsílacího výkonu **EIRP** (např. *14 dBm*). Profil na závěr potvrdit tlačítkem **CREATE DEVICE-PROFILE**. Pro jednotlivá koncová zařízení, která bude chtít uživatel zaregistrovat do sítě je potřeba vytvořit skupiny **Applications**, které mají za úkol zpřehlednit správu. Po přesunutí se do nabídky **Applications**, lze pomocí tlačítka **+CREATE** vytvořit novou skupinu. Uživatel je dotázán na vytvoření názvu aplikace (např. *application*), dále popis (napr. *application*), volbu již vytvořeného Service-profile (*serviceProfile*), kodek payloadu (*none*). Na závěr tlačítkem **CREATE APPLICATION** potvrdit aplikaci. Tímto byla završena konfigurace profilů a komponent, následně už lze provést registraci brán a koncových zařízení do sítě.

## Registrace brány

Aby mohl **Network Server** přijímat data z koncových zařízení, je potřeba do sítě připojit brány, které komunikaci s koncovými zařízeními zprostředkují. Registrace brány probíhá následujícím způsobem. Na adrese `http://localhost:8080/` po přihlášení zvolit v menu **Gateways** a tlačítkem **+CREATE** vyvolat nabídku pro registraci. Uživatel je dále vyzván k vytvoření symbolického názvu pro bránu (např. *home-Gateway*), doplnit popis (např. *localGateway*), zadat unikátní **GwID** brány (např. *AA555A0000000101*), vybrat již vytvořený Network Server (*NetServer*) a vybrat Gateway Profile (např. *gatewayProfile*). Na závěr potvrdit registraci tlačítkem **CREATE GATEWAY**. Při výběru brány v menu **Gateways**, lze spatřit dobu od navázání poslední komunikace brány s LoRa Serverem, viz obr. 4.11.



Obr. 4.11: Detail administrace LoRa severu.

### Registrace koncového zařízení

Posledním prvkem chybějícím v síti jsou koncová zařízení. V této části je popsán způsob registrace pomocí ABP. Na adrese <http://localhost:8080/> po přihlášení zvolit v menu **Applications** a po výběru aplikace, do které bude koncové zařízení přiřazeno, vyvolat registraci volbou tlačítka **+CREATE**. Testovací senzor byl zaregistrován s těmito údaji:

Device name:	LoRa_GSP_sensor,
Device description:	justSenzor,
Device EUI:	47BAC86800290021,
Device-profile:	deviceProfile,
Disable frame-counter validation:	<input checked="" type="checkbox"/>

Volbou **CREATE DEVICE**, však zařízení není plně registrováno, je nutné ještě zadat šifrovací klíče a to volbou položky **ACTIVATION**, kde byly zadány tyto údaje:

Device address:	006FF2FA,
Network session key:	AB33707AE5EEEA8F07F802177361B6D1,
Application session key:	221F8D62A99110ABB1910CC5D3C5F583.

Závěrem volbou **REACTIVATE DEVICE**, je zařízení plně registrováno.

## Ukládání dat v Node-RED

Výše zmíněné kroky popisují, jak vytvořit síť jako takovou, avšak ta se stará pouze o správnou funkci protokolu. Data přijatá z koncových zařízení v síti, je tedy nutné posílat někam, kde dojde k jejich zpracování (uložení, vyvolání nějaké akce, atd.). O tuto část se stará program Node-RED, který naslouchá MQTT-tématu a přijatá data ukládá do textového souboru. Program je v plnohodnotné verzi operačního systému Raspbian již předinstalován, pomocí následujícího příkazu jej lze aktualizovat případně nainstalovat:

```
bash <(curl -sL https://raw.githubusercontent.com/
node-red/raspbian-deb-package/master/resources/
update-nodejs-and-nodered).
```

Dále je důležité povolit autostart služby při načítání operačního systému, provést restart a vypsát aktuální stav programu:

```
sudo systemctl enable nodered.service,
sudo systemctl restart nodered.service,
sudo systemctl status nodered.service.
```

Program vypíše do konzole adresu, na které lze program Node-RED skrze webový prohlížeč ovládat. Ve výchozím nastavení je to adresa: `http://localhost:1880`. Program nabízí jednoduché uživatelské prostředí na orientaci. V levém panelu se nacházejí funkční bloky, které lze pomocí tažení myši přetáhnout do pole návrhu, kde lze tyto bloky různě propojovat. Ukládání přijatých zpráv z koncového zařízení (JSON) na SD kartu, lze vytvořit následujícím způsobem. Výběrem bloku MQTT ze sekce **output** z levého panelu a přetažením do pole návrhu. Dvojklikem levého tlačítka myši se zobrazí nabídka nastavení bloku. Zde je důležité zadat adresu serveru, ze kterého lze přijímat MQTT zprávy. Volbou **Add new mqtt-broker...**, lze záznam brokeru vytvořit. Položky byly vyplněny následovně:

```
Name: mqtt_LoRa_appServer,
Server: localhost,
Port: 1883.
```

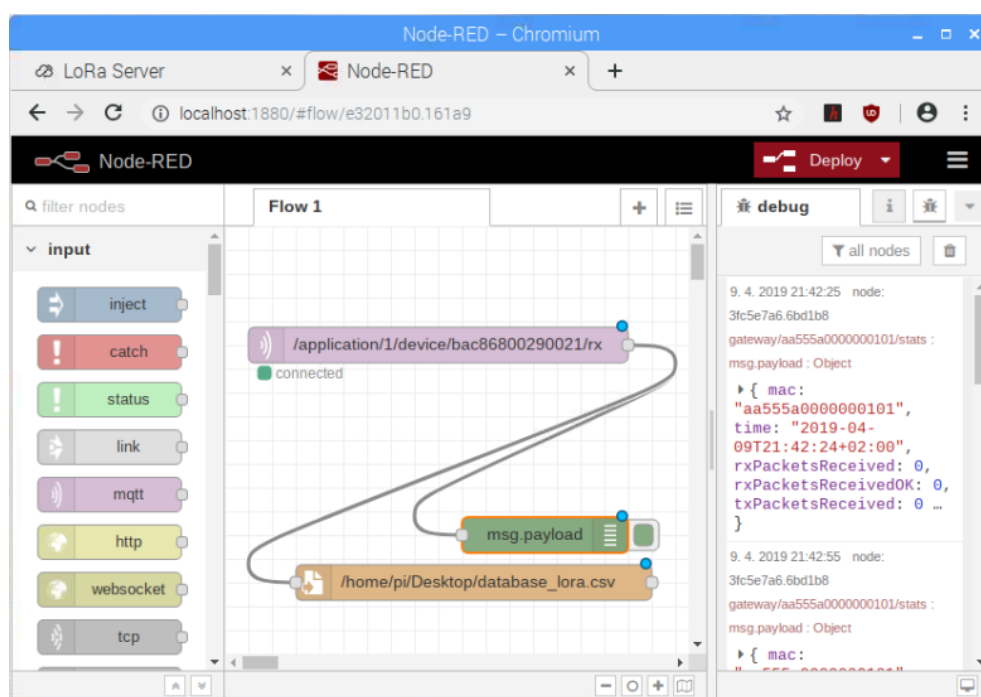
Ostatní položky byly ponechány beze změny. Tlačítkem **Update**, lze potvrdit a vrátit se zpět do nabídky o úroveň výše a vyplnit zbylé položky:

```
Topic: /application/1/device/bac86800290021/rx,
QoS: 0,
Output: auto-detect (string or buffer).
```

Nastavení potvrdit tlačítkem **Done**. Tímto byl nastaven blok MQTT listeneru, k němu lze rovnou připojit blok **file** ze sekce **Storage**, který lze nastavit následovně:

Filename: `/home/pi/Desktop/database_lora.csv`,  
Action: `append to file`,  
Add new line to each payload: ☒,  
Create directory if not exist: ☒.

Na závěr stačí funkční bloky propojit tažením myši. Celé sestavení je pak nutné potvrdit tlačítkem **Deploy**. Následně je každá zachycená zpráva na daném MQTT-tématu uložena do textového souboru. Náhled sestavení funkčních bloků viz obr. 4.12.



Obr. 4.12: Zachytávání MQTT zpráv do souboru v Node-RED.

#### 4.4.6 Simulace

Pro otestování přesnosti samotného výpočetního algoritmu, byl napsán program v jazyce C#. Do programu lze zadat zeměpisné souřadnice potencionálního umístění LoRaWAN<sup>TM</sup> brán. Následně je provedena simulace s grafickým výstupem, kde jsou zobrazeny ve 2D rovině brány, prostor kolem nich je vyplněn barvou, která udává jak velkou chybu výpočtu polohy z daného místa zanechá lokalizační algoritmus, viz obr. 4.13. Souřadnice brán neslouží pro reálnou simulaci prostředí, ale

pro stanovení vzájemných vzdáleností. V simulaci nejsou vzaty v potaz parametry z reálného prostředí jako jsou odrazy signálu, nepřesná časová synchronizace přijímačů a terén. Princip funkce programu je následující. Program načte souřadnicové

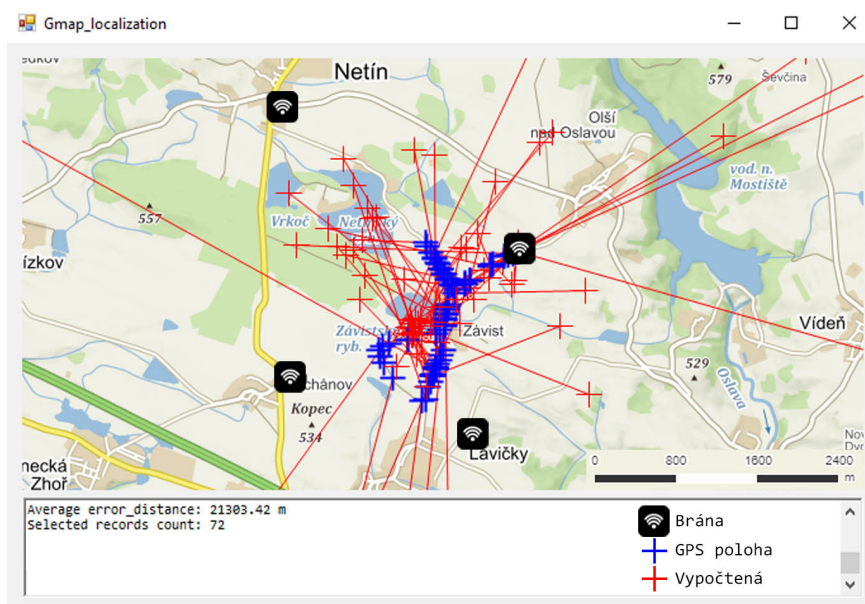


Obr. 4.13: Výsledky simulace chybovosti lokalizačního algoritmu.

body brán a vypočte potřebné měřítko tak, aby se všechny brány vešly do elementu `pictureBox` (grafického výstupu). Poté jsou pro každý zobrazený pixel grafického výstupu podle měřítka vypočteny jeho souřadnice. Pomocí spočítaných vzdáleností souřadnic mezi potencionálním vysílacím bodem (pixel) a bránami, jsou vypočteny doby propagace signálu. Z těchto dat je vytvořen objekt informací. Podobně jako u LoRaWAN™, kde přichází zpráva na Network Serveru obsahuje pouze časové značky příchozí rámců na brány a souřadnice brán, které zprávu zachytily. V tomto případě je uvažováno, že všechny brány zachytí zprávu. Následně jsou pro tento objekt vypočteny souřadnice místa vysílání pomocí TDoA algoritmu. Na závěr je vypočtena vzdálenost mezi původními souřadnicemi a vypočtenými souřadnicemi. V závislosti na této vzdálenosti je pak každému pixelu přiřazena barva. Následně lze pozorovat, jak jsou ovlivněny přesnosti výpočtu polohy v oblastech okolo brán v závislosti na jejich rozmístění. Rozložení brán bylo vybráno z důvodu plánování reálného nasazení.

#### 4.4.7 Výsledky měření

Experimentální měření proběhlo na venkově v kraji Vysočina, v okrese Žďár nad Sázavou, v obci Závist. Brány byly rozmístěny na stejná místa jako v simulačním programu, který je popsán v podsekcí 4.4.6. Jak lze pozorovat na obr. 4.14, výsledky výpočtu polohy jsou kolísavé přičemž některé jsou i velmi odlehlé. Průměrná chyba činí  $\approx 21$  km, přičemž maximální chyba odlehlých výsledků (extrémů) činí  $\approx 100$  km. Vysílací koncové zařízení bylo nakonfigurováno tak, aby odesílalo zprávu každých 30 vteřin. Faktor rozptřeni (SF) byl nastaven na fixní hodnotu 12.



Obr. 4.14: Vizualizace z reálného prostředí: surová data.

#### 4.4.8 Filtrace dat

Vzhledem k naměřeným výsledkům bylo nutné na vypočtená data aplikovat filtr. Jednoduché a efektivní řešení, které potlačí odlehlé výsledky je filtrace pomocí klouzavého mediánu. Tedy, že je vytvořena FIFO fronta o velikosti definované šířky klouzavého okna, ze kterého je při každém výpočtu odebrán nejstarší prvek a přidán aktuálně vypočtený. Následně je nalezen medián těchto čísel. Vzhledem k tomu, že systém souřadnic UTM využívá k popisu polohy 2 hodnoty (osy X a Y), jsou vytvořeny 2 nezávislé klouzavé okna (tedy fronty). V posledním kroku jsou vytvořeny další 2 FIFO fronty o definované šířce průměrovacího okna, do kterých jsou přidávány nalezené mediány a je vypočten průměr. Tímto dochází k vyhlazení ostrých přechodů mezi výsledky. Vypočítaný průměr je použit jako výsledek řešení. Nevýhodou tohoto

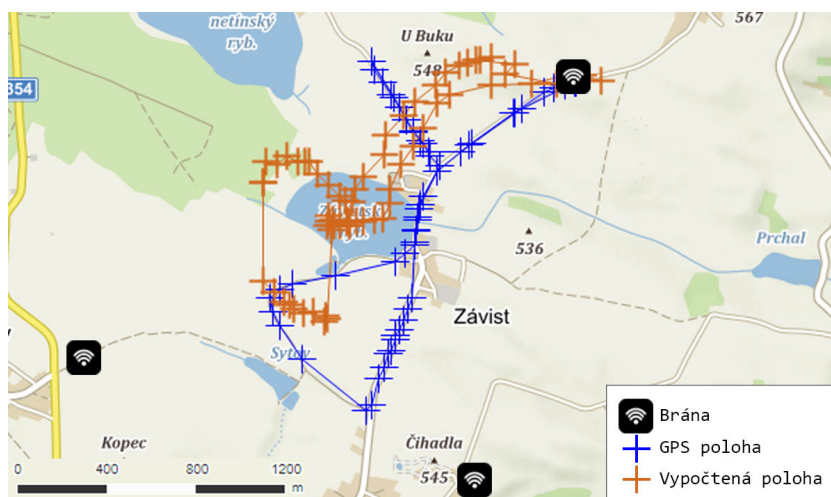


řešení je, že u prvních hodnot vstupujících do front určených pro filtrování, nedochází k filtraci vzhledem k neexistenci předchozích výsledků. Dále je nutné vhodně definovat šířky front (tedy velikosti oken) pro selekci mediánu a průměrování. V rámci ladění byla za ideální stanovena šířka fronty pro hledání mediánu na 6 hodnot a šířka fronty pro průměrování na 10 hodnot. Tabulka 4.2 srovnává průměrnou chybu od-

Tab. 4.2: Srovnání průměrných výpočtu polohy

Data	Přesnost [m]
Surová data	21303,42
Klouzavý medián	630,97
Klouzavý průměr mediánů	558,31

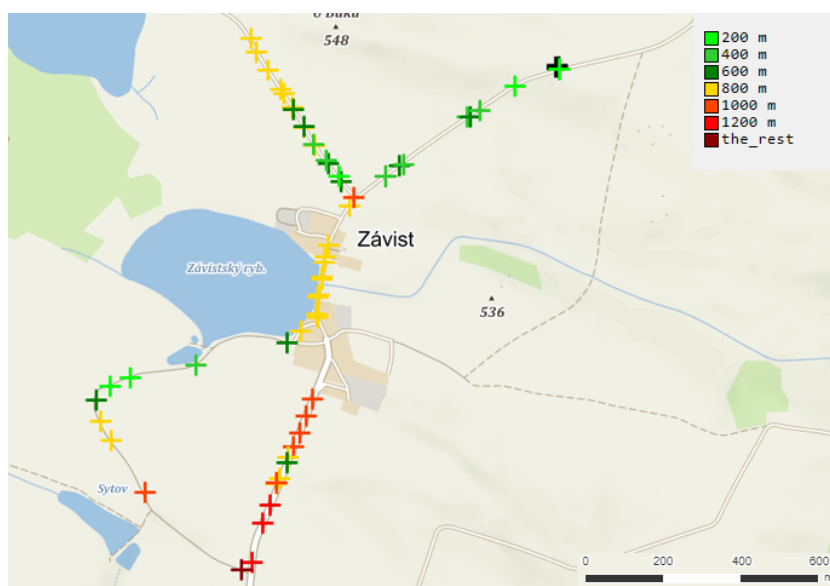
hadu polohy zařízení v různých fázích zpracování. Lze pozorovat, že filtrace pomocí mediánů účinně odstraňuje odlehlé výsledky, následné průměrování až tak razantní vliv nemá, avšak zlepšení o  $\approx 73$  m je také nezanedbatelné. Na obrázku 4.15, lze



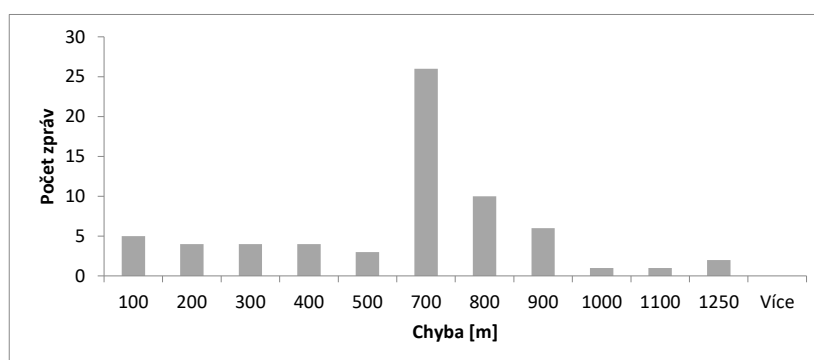
Obr. 4.15: Aplikovaný filtr klouzavých průměru mediánů.

vizuálně pozorovat reálnou polohu určenou pomocí GPS (modrá barva) a vypočtenou polohu po filtraci (hnědá barva). Stejná data vyjádřená v podobě grafu, kde lze pozorovat kolísavost surových dat a kde jsou navíc vyneseny výsledky mediánů před průměrováním, viz obr 4.18. Dalším způsobem, jak vizuálně vyjádřit přesnost odhadu polohy je vykreslení původních bodů, ze kterých došlo k odeslání zprávy a tomuto bodu přiřadit barvu v závislosti vzdálenosti mezi vypočtenou a původní polohou, viz obr. 4.16. Lze pozorovat, že při průchodu vesnicí a dále po silniční komunikaci na sever od vesnice, nastává stejná chyba při cestě tam i zpět. Podle grafu

histogramu 4.17 lze pozorovat, že vypočtená poloha se od původní nejčastěji liší o 700 m a maximální chyba není větší než 1250 m.



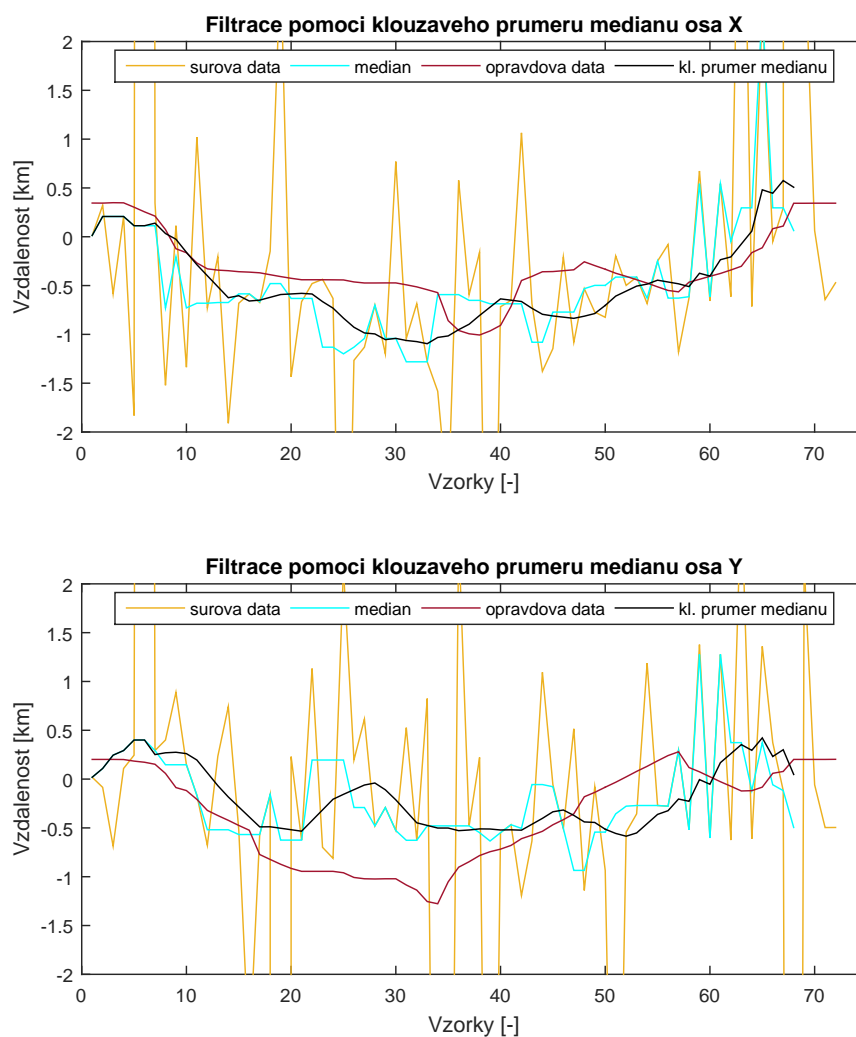
Obr. 4.16: Aplikovaný filtr klouzavých průměru mediánů: velikost chyby.



Obr. 4.17: Histogram ze 72 odeslaných zpráv.

#### 4.4.9 Důvody vzniku chyby vypočtené polohy

Brány byly rozmístěny tak, aby přímá viditelnost na ně byla v kopcovité, místy lesnaté krajině umožněna co možná nejvíce. Vzhledem k terénním podmínkám tedy nebylo možné brány rozmístit do ideálního čtvercového tvaru. Podle simulace, by lokalizace uvnitř pomyslného tvaru pro který brány tvoří obvod, však měla dosahovat vysoké přesnosti. Na obrázku 4.16 lze pozorovat, že v oblasti těsně nad vesnicí (směr



Obr. 4.18: Filtrace naměřených dat: graf.

sever) dosahuje přesnost přibližně 600 m, to je dáno tím, že v těchto místech je přímá viditelnost na všechny 4 brány. Uprostřed vesnice je přesnost zhoršena o 200 m, což je zapříčiněno odrazy od okolních budov. Směrem na jih od vesnice již cesta stoupá do kopce a v tomto důsledku je zamezeno přímé viditelnosti na jednu z brán, z toho důvodu se přesnost v těchto místech snižuje o dalších 400 m.

### Vysílací výkon

Vysílací výkon také ovlivňuje schopnost rozlišit odražený signál od přímého. Doba přenosu může být dynamicky měněna s využitím funkce ADR. Vzhledem k regulaci pásma je však maximální vysílací výkon omezen. Pokud se nejedná o přenos za přímé viditelnosti, je obtížné přijmout signál bez odrazu. Schopnost přijmout přímý signál je vyjádřena následovně [28]:  $DOBA\ PŘENOSU \times ŠÍŘKA\ PÁSMA \times VÝKON$ .

## Vícecestné šíření

Nejen v městských oblastech nastává problém vícecestného šíření, to je dáno tím, že vysílač a brána mezi sebou nemají přímou viditelnost (LOS) a tak se signál během šíření odrazí například o budovy, takzvaná komunikace NLOS. Tímto způsobem dochází příjmu signálů s různým zpožděním. Standardní šířka pásma LoRa® signálu činí 125 kHz. Vztah, který vyjadřuje schopnost rozlišit odražený signál je určen následovně [28]:

$$\frac{c}{125 \text{ kHz}} = 2398 \text{ m.} \quad (4.9)$$

Pokud brána přijme signál, který se šíří přímou cestou a zároveň stejný odražený (opožděný) signál, je nemožné tyto signály rozlišit, pokud je rozdíl v odražené vzdálenosti menší jak 2,4 km. V tomto případě dojde k ovlivnění přímého signálu, který je sečten s odraženým (dojde ke změně amplitudy) a je opožděn. Se zvyšující se šířkou pásma, se zvyšuje schopnost přijímače rozlišit přímé a odražené signály. V případě, že dochází k příjmu pouze odraženého signálu (budovy, panelové domy), je téměř nemožné rozlišit, že doba přenosu je mnohonásobně navýšena a neodpovídá tak době šíření na přímou vzdálenost, je tedy zanesena chyba [28].

## Srovnání časové reference mezi bránami v těsné blízkosti

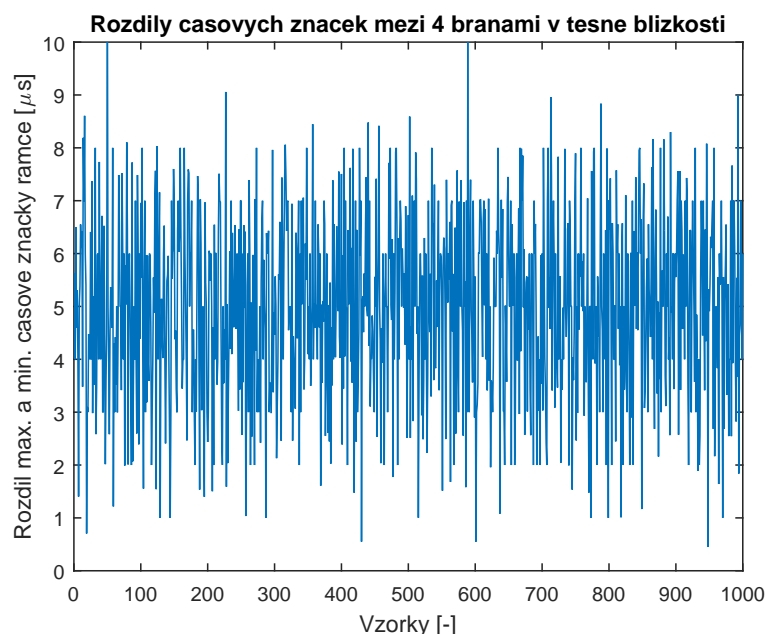
Bylo provedeno měření, které mělo za cíl ověřit, jak velký vzniká rozdíl přidělených časových razítek příchozím rámcům v bránách, které jsou v těsné blízkosti. Brány (celkem 4) byly rozmístěny v řadě vedle sebe a koncové zařízení vysílalo kolmo na řadu těchto bran ve vzdálenosti  $\approx 5$  m, faktor rozprostření pro koncové zařízení byl nastaven na hodnotu 8. V ideálním případě by rozdíly mezi časovými razítky mely být nulové, neboť časové vzdálenosti mezi koncovým zařízením a bránami jsou stejné. V tabulce 4.3, jsou uvedeny statistické hodnoty, jako je maximální/minimální

Tab. 4.3: Srovnání rozdílů časových značek mezi bránami

	Čas [us]
<b>Minimální rozdíl</b>	0,449
<b>Medián</b>	5
<b>Maximální rozdíl</b>	11,380

hodnota a medián časových rozdílů. Už z těchto výsledků je patrné, že poměrně velká chyba vzniká při přidělování časových razítek. Tuto chybu je však možné částečně potlačit průměrováním u staticky umístěných koncových zařízení. Obrázek 4.19 graficky znázorňuje absolutní hodnoty rozdílů časových razítek pro 1000 zpráv. Měření

však probíhalo v otevřené kopcovité krajině, kde není možné zaručit, že nedocházelo k jevu vícecestného šíření a tedy ovlivnění signálu. Vzhledem k tomu, že by bylo technicky náročné zaznamenávat čas vysílání a k němu vztahovat hodnoty časových razítek, byly porovnány alespoň rozdíly samotných časových razítek mezi sebou.



Obr. 4.19: Rozdíly časových značek příchozích rámců mezi 4 bránami.

## Zhodnocení

Z výše rozebraných důvodů vzniku chyby při pasivním určování polohy pomocí metody TDoA, lze usoudit, že lokalizace v LoRaWAN™ je možná i s bránami první generace, avšak jen pouze pro specifické aplikace, kde není vysoká přesnost důležitým parametrem. Jedním z možných využití je například sledování polohy zásilky u přepravních společností. To však s sebou nese problémy spojené s celoplošným pokrytím a roamingem v zahraničí. Na druhou stranu určování polohy zařízení touto metodou nevyžaduje nákladnou investici pro implementaci. Byly zmíněny důvody vzniku chyby, problémy úzké šířky pásma LoRa® signálu, které však nedokáže vyřešit ani druhá generace brán, která je již uzpůsobena potřebám lokalizace v LoRaWAN™ síti. Druhá generace však eliminuje chybu vznikající při přidělování časových značek příchozím rámcům, kde podle výsledků praktického měření vzniká u první generace poměrně velká chyba. Další možností zpřesnění je zvýšení počtu brán a využití kombinace metod TDoA a RSSI. Poslední velmi důležitou částí je využití vhodného algoritmu pro výpočet polohy také aplikací pokročilých statistických algoritmů pro zpřesnění.

## 5 Závěr

V rámci semestrálního projektu byly podrobně rozebrány detaily jak fyzické vrstvy LoRa®, tak i detaily protokolu LoRaWAN™ pracujícího na linkové vrstvě. Dále byly obecně popsány různé principy technik lokalizace radiových zařízení. V rámci praktické části byly vybrány vhodné metody pro lokalizaci v LoRaWAN™ síti a byla provedena analýza sítí ČRa a VUT. Pro umožnění lokalizace s využitím výpočtu pomocí metody TDOA, je pro lokalizaci ve 2D zapotřebí pro samotný výpočet data minimálně ze 3 brán (přijímačů). Lokalizace pomocí výpočtu z hodnot RSSI nebyla blíže prozkoumána z důvodu nižší přesnosti oproti metodě TDoA, lze však do budoucna prozkoumat možnosti kombinace obou metod (TDoA a RSSI) za účelem zvýšení přesnosti. Pro lokalizaci pomocí TDOA je dále nutné, aby brány měly přesnou časovou synchronizaci, té lze dosáhnout s využitím GPS modulu. Jedním z výstupních pinů GPS modulu (uBlox MAX-7Q) je *TIMEPULSE*, který poskytuje přesnou časovou synchronizaci signálem PPS (pulse per second) tedy s frekvencí 1 Hz, kontakt lze propojit přímo s integrovaným obvodem SX1301, který tvoří jádro LoRaWAN™ koncentrátoru. Síť VUT je tvořena pouze 2 bránami, ze kterých ani jedna nevyužívá časové synchronizace pomocí GPS a tudíž není vhodná pro lokalizaci ať už z pohledu časové synchronizace nebo nízkého počtu brán. Síť ČRa využívá brány od 2 výrobců (Kerlink, RisingHF), přičemž jsou pro lokalizaci použitelné pouze brány od společnosti Kerlink, ČRa však v oblasti Brna-města provozuje pouze 4 tyto brány a tak tato síť není ideální pro vývoj lokalizačního algoritmu vzhledem ke špatné propagaci a odrazům signálu v hustě obydlených městských částech. Z tohoto důvodu a dále z důvodu vysokých finančních nároků na koupi brán umožňujících lokalizaci, bylo přistoupeno v rámci diplomové práce k návrhu postavení vlastních LoRaWAN™ brán a vytvořit tak testovací síť. Zde nastávaly 2 možnosti provedení, první je rozšíření stávajících koncentrátorů (radiový segment brány) o GPS modul a druhou možností je kompletní výroba koncentrátoru, ve kterém je již zakomponován i GPS modul. Bylo přistoupeno k provedení obou řešení a bylo dokázáno, že si lze LoRaWAN™ bránu vyrobit svépomocí. Výroba vlastních LoRaWAN™ brán dále prohloubila znalosti z celé problematiky LoRaWAN™ protokolu a také lokalizace. V dalších krocích bylo nutné zprovoznit software brán a také provést potřebné úpravy konfigurace. Pro zjednodušení celkem chaotického postupu, byly všechny kroky provázející instalaci a konfiguraci software detailně popsány. Dále byl zhotoven bezdrátový senzor (koncové zařízení) s GPS modulem pro testování lokalizace, který v payloadu rámce odesílá informace o poloze. Vzhledem k nízké hustotě nasazených brán v síti ČRa, nepokračoval vývoj původně plánovaným směrem k rozšíření sítě o lokalizační rozšiřující modul, ale pro možnost vyzkoušení v různých LoRaWAN™ sítích byl napsán samostatný program v jazyce C#, který z dat

ze sítě ve struktuře JSON zpráv provede výpočet polohy koncového zařízení. Tento program využívá mapových podkladů společnosti *seznam.cz* a umožňuje vykreslování GPS souřadnic, vypočtených podle algoritmu využívajícího techniku TDOA. V rámci lokalizačního software tak byla vypočítána poloha senzoru z časových značek příchodu rámce do brán, která je dále přímo porovnatelná s reálnou polohou uvedenou v payloadu rámce (zjištěnou pomocí GPS). V neposlední řadě byla provedena simulace lokalizačního algoritmu pro stanovení možností a limitů a bylo zjištěno, že aby zvolený algoritmus správně určoval polohu koncového zařízení, jsou potřeba data minimálně ze 4 brán. Tento program pak v případě navazujících prací umožní vizuální porovnání dalších lokalizačních algoritmů. Během měření v terénu byly prakticky ověřeny schopnosti lokalizace v LoRaWAN™ síti, kde bylo dosaženo ve venkovské oblasti chyby výpočtu polohy průměrně  $\approx 21$  km. Pomocí filtru klouzavého průměru mediánů byly efektivně potlačeny odlehlé výsledky (extémy) a výpočet polohy se již stal použitelný, průměr chyby výpočtu byl tak následně stanoven na  $\approx 550$  m. V posledním kroku byly rozebrány důvody vzniku nepřesností výpočtu polohy a rozebrány další možnosti zlepšení. Vzhledem ke komplexnosti lokalizační problematiky byly ověřeny teoretické předpoklady a provedené potřebné úpravy sítě. Pokročilé algoritmy zpřesňování určení polohy, například s využitím strojového učení již nebyly z časové náročnosti hlouběji prozkoumány, avšak mohou být předmětem zkoumání pro navazující disertační práci.

# Literatura

- [1] KNYAZEY, Nikolay S., Victor A. CHECHETKIN a Denis A. LETAVIN.: *Comparative analysis of standards for Low-power Wide-area Network*. In: *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*, 2017 [online]. IEEE, 2017, s. 1-4 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997528.
- [2] J. BARDYN, T. MELLY, O. SELLER and N. SORNIN, *IoT: The era of LPWAN is starting now* ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference, Lausanne, 2016 [online]. IEEE, 2016, s. 25-30 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.1109/ESSCIRC.2016.7598235
- [3] *LoRaWAN™ What is it?: A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™* [online]. In: , Semtech Corporation. 2400 Camino Ramon, #375, San Ramon, CA 94583, listopad 2015, s. 20 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z URL: <<https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>>.
- [4] MROUE, Hussein.: *Analytical and Simulation study for LoRa Modulation* [online]. France, červen 2018, , 5 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <[https://www.researchgate.net/publication/324703847\\_Analytical\\_and\\_Simulation\\_study\\_for\\_LoRa\\_Modulation](https://www.researchgate.net/publication/324703847_Analytical_and_Simulation_study_for_LoRa_Modulation)>.
- [5] REYNDERS, Brecht a Sofie POLLIN. *Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication*. In: *Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*, 2016 Symposium on [online]. IEEE, 2016, s. 1-5 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.1109/SCVT.2016.7797659.
- [6] BERNI, A. a W. GREGG.: *On the Utility of Chirp Modulation for Digital Signaling*. *Communications, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1973, 21(6), 748-751 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.1109/TCOM.1973.1091721. ISSN 0090-6778.
- [7] *An Introduction to Spread-Spectrum Communications: TUTORIAL 1890* [online]. Maxim Integrated Products, únor 2003 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1890>>.
- [8] CENTENARO, Marco, Lorenzo VANGELISTA, Andrea ZANELLA a Michele ZORZI. *Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios*. *Wireless Communications, IEEE* [online]. USA:



- IEEE, 2016, 23(5), 60-67 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743. ISSN 1536-1284.
- [9] TELKAMP, Thomas. *LoRa, LoRaWAN, and the challenges of long-range networking in shared spectrum* [online]. NL: Cognitive Radio Platform, prosinec 2015 [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <<https://www.kivi.nl/uploads/media/584e9180f3822/cr-platform-lora-workshop-shared.pdf>>.
- [10] *LoRaWAN<sup>TM</sup> Specification 1R0* [online]. LoRa Alliance, 2015, 82 [cit. 2018-10-13]. Dostupné z: <<https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf>>.
- [11] *LoRa<sup>TM</sup> Modulation Basics: AN1200.22* [online]. Semtech Corporation, květen 2015, 26 [cit. 2018-10-12]. Dostupné z: <<https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>>.
- [12] CLAUSEN, Thomas a William TOWNSLEY. *A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors* [online]. Basel: MDPI, 2016, 16(9), 1466 [cit. 2018-10-14]. DOI: 10.3390/s16091466. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <<http://search.proquest.com/docview/1882248452/>>.
- [13] ADELANTADO, Ferran, Xavier VILAJOSANA, Pere TUSET-PEIRO, Borja MARTINEZ, Joan MELIA-SEGUI a Thomas WATTEYNE. *Understanding the Limits of LoRaWAN. Communications Magazine, IEEE* [online]. USA: IEEE, 2017, 55(9), 34-40 [cit. 2018-10-25]. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600613. ISSN 0163-6804.
- [14] *Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility* [online]. 2018, , 21 [cit. 2018-10-25]. DOI: 10.1109/COMST.2018.2877382. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8502812>>.
- [15] ONIGA, B., V. DADARLAT, Eli DE POORTER a A. MUNTEANU. *A secure LoRaWAN sensor network architecture* [online]. In: . 2017 [cit. 2018-10-25]. ISBN 978-1-5090-1012-7. ISSN 1930-0395. Dostupné z: <<https://biblio.ugent.be/publication/8541709>>.
- [16] KOS, T., M. GRGIC a G. SISUL. *Mobile User Positioning in GSM/UMTS Cellular Networks. In: Multimedia Signal Processing and Communications*, 48th

- International Symposium ELMAR-2006 focused on [online]. IEEE, 2006, s. 185-188 [cit. 2018-10-28]. DOI: 10.1109/ELMAR.2006.329545. ISBN 9537044033. ISSN 1334-2630.
- [17] M. LAARAIEDH, L. YU, S. AVRILLON and B. UGUEN, *Comparison of Hybrid Localization Schemes using RSSI, TOA, and TDOA* 17th European Wireless 2011 - Sustainable Wireless Technologies, Vienna, Austria, 2011, s. 1-5 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5898074&isnumber=5897969>>.
- [18] *Location Tracking Approaches: Chapter 2. Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide* [online]. Cisco, 2014, , 1-14 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <<https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/WiFiLBS-DG/wifich2.pdf>>.
- [19] DARDARI, D., A. CONTI, U. FERNER, A. GIORGETTI a M.Z. WIN. *Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments*. Proceedings of the IEEE [online]. USA: IEEE, 2009, 97(2), 404-426 [cit. 2018-10-30]. DOI: 10.1109/JPROC.2008.2008846. ISSN 0018-9219.
- [20] ROBERTS, Rick. *TDOA Localization Techniques. IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs)* [online]. Harris Corporation, 2004, , 11 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <<https://www.enriquedans.com/wp-content/uploads/2013/03/TDOA-localization-techniques.pdf>>.
- [21] *LoRa Alliance Geolocation Whitepaper: LoRa Alliance™ Strategy Committee* [online]. In: . LoRa Alliance, leden 2018, s. 15 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <[https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/geolocation\\_whitepaper.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/geolocation_whitepaper.pdf)>.
- [22] ZHOU, Zilong, Yichao RUI, Jing ZHOU, Longjun DONG, Lianjun CHEN, Xin CAI a Ruishan CHENG. *A New Closed-Form Solution for Acoustic Emission Source Location in the Presence of Outliers* [online]. 2018, , 21 [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/6/949/pdf>>.
- [23] GILLETTE, M.D. a H.F. SILVERMAN. *A Linear Closed-Form Algorithm for Source Localization From Time-Differences of Arrival. Signal Processing Letters, IEEE* [online]. USA: IEEE, 2008, 15, 1-4 [cit. 2018-12-06]. DOI: 10.1109/LSP.2007.910324. ISSN 1070-9908.

- [24] *Universal Transverse Mercator coordinate system* [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/UniversalTransverseMercatorcoordinatesystem>>.
- [25] *U-blox 6 Receiver Description: Including Protocol Specification* [online]. GPS.G6-SW-10018-F. Switzerland: u-blox, 2013 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6\\_ReceiverDescrProtSpec\\_%28GPS.G6-SW-10018%29\\_Public.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6_ReceiverDescrProtSpec_%28GPS.G6-SW-10018%29_Public.pdf)>.
- [26] WHANG, Will. *LoRa-concentrator* [online]. In: . Will Whang's Electronics, 2018 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <<https://github.com/will1127534/LoRa-concentrator/tree/master/Version3/RPI>>.
- [27] *MAX-7: u-blox 7 GNSS modules* [online]. UBX-13004068. www.ublox.com, 2014 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/MAX-7\\_DataSheet\\_%28UBX-13004068%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/MAX-7_DataSheet_%28UBX-13004068%29.pdf)>.
- [28] RAY, BRIAN. *LoRa Localization* [online]. LinkLabs, 2016, [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <<https://www.link-labs.com/blog/lora-localization>>.

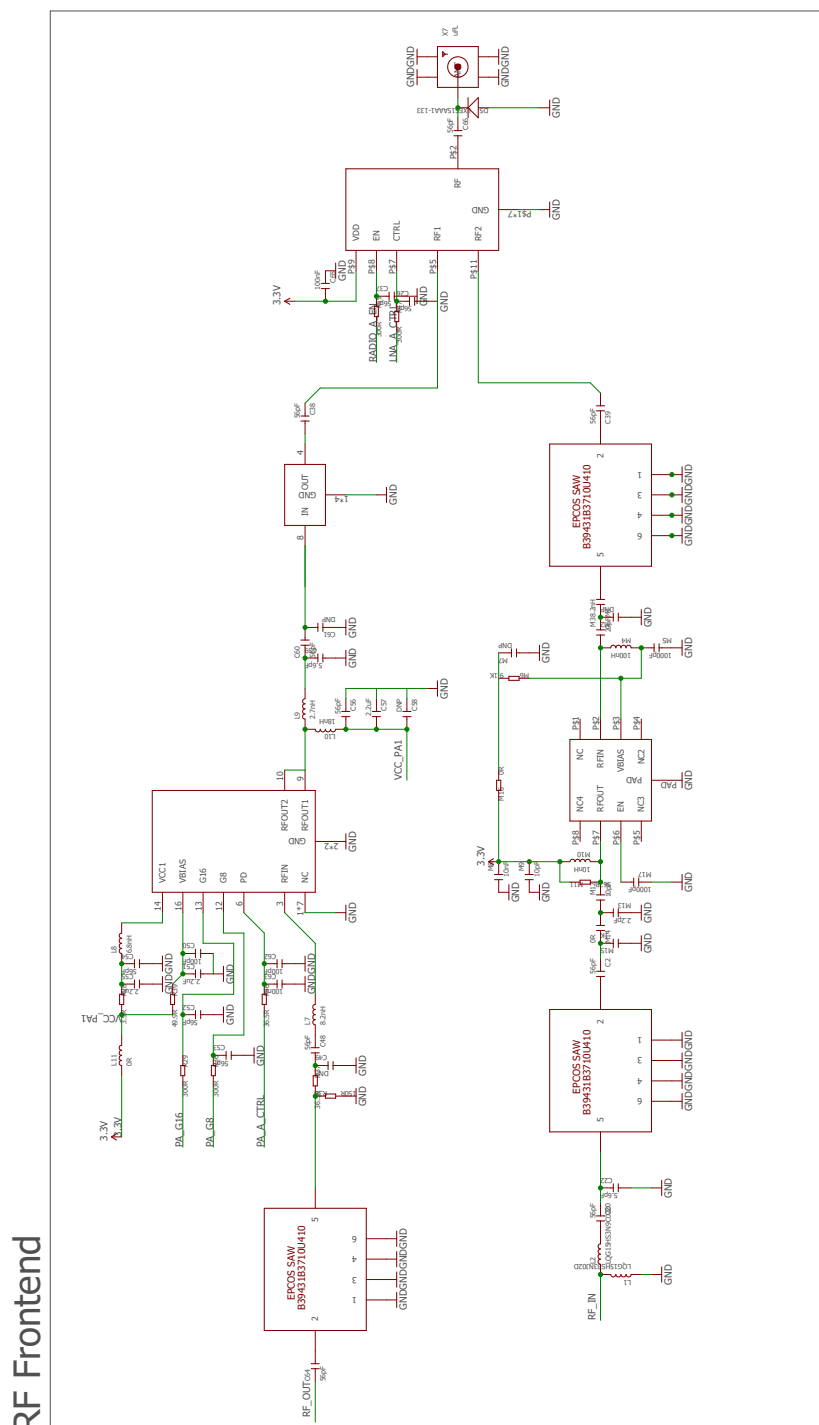
# Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>bps</b>	bitů za vteřinu - bits per second
<b>kbps</b>	kilobitů bitů za vteřinu - kilobit per second
<b>SIM</b>	účastnická identifikační karta - Subscriber Identity Module
<b>mesh</b>	topologie sítě, ve které jsou některé uzly přímo propojeny s více než jedním dalším uzlem v síti
<b>e-SIM</b>	integrovaná SIM karta, která má podobu čipu integrovaného na základní desce
<b>QoS</b>	rezervace a řízení datových toků v datových sítích - Quality of Service
<b>RSSI</b>	indikátor síly přijímaného signálu - Received Signal Strength Indication
<b>FSK</b>	klíčování frekvenčním posuvem - Frequency-Shift Keying
<b>BW</b>	šířka pásma - Bandwidth
<b>FEC</b>	samoopravný kód - Forward Error Correction
<b>MAC</b>	Řízení přístupu ke sdílenému médiu - Medium Access Control
<b>GPS</b>	Globální polohový systém - Global Positioning System
<b>GNSS</b>	Globální družicový polohový systém - Global Navigation Satellite System
<b>LOS</b>	Přímá viditelnost - Line Of Sight
<b>NLOS</b>	Nepřímá viditelnost - Non Line Of Sight
<b>LBS</b>	Služby stojící na určení polohy uživatele - Location-Based Service
<b>BTS</b>	Základnová převodní stanice - Base Transceiver Station
<b>TDMA</b>	Časový multiplex - Time Division Multiple Access
<b>RX</b>	Směr proudících dat - příjem - Receive
<b>TX</b>	Směr proudících dat - odesílání - Transmit
<b>TOF</b>	Doba šíření signálu - Time Of Flight
<b>RTT</b>	Obousměrné zpoždění - Round Trip Time
<b>WSN</b>	Bezdrátová senzorová síť - Wireless Sensor Network
<b>NTP</b>	Protokol pro synchronizaci vnitřních hodin počítačů skrze paketovou síť - Network Time Protocol
<b>WPF</b>	Knihovna pro tvorbu grafického rozhraní v .NET - Windows Presentation Foundation
<b>SPI</b>	Sériové periferní rozhraní - Serial Peripheral Interface
<b>FIFO</b>	Způsob plnění fronty: První dovnitř, první ven - First In, First Out
<b>ČRa</b>	České radiokomunikace

## A Obsah přiloženého CD

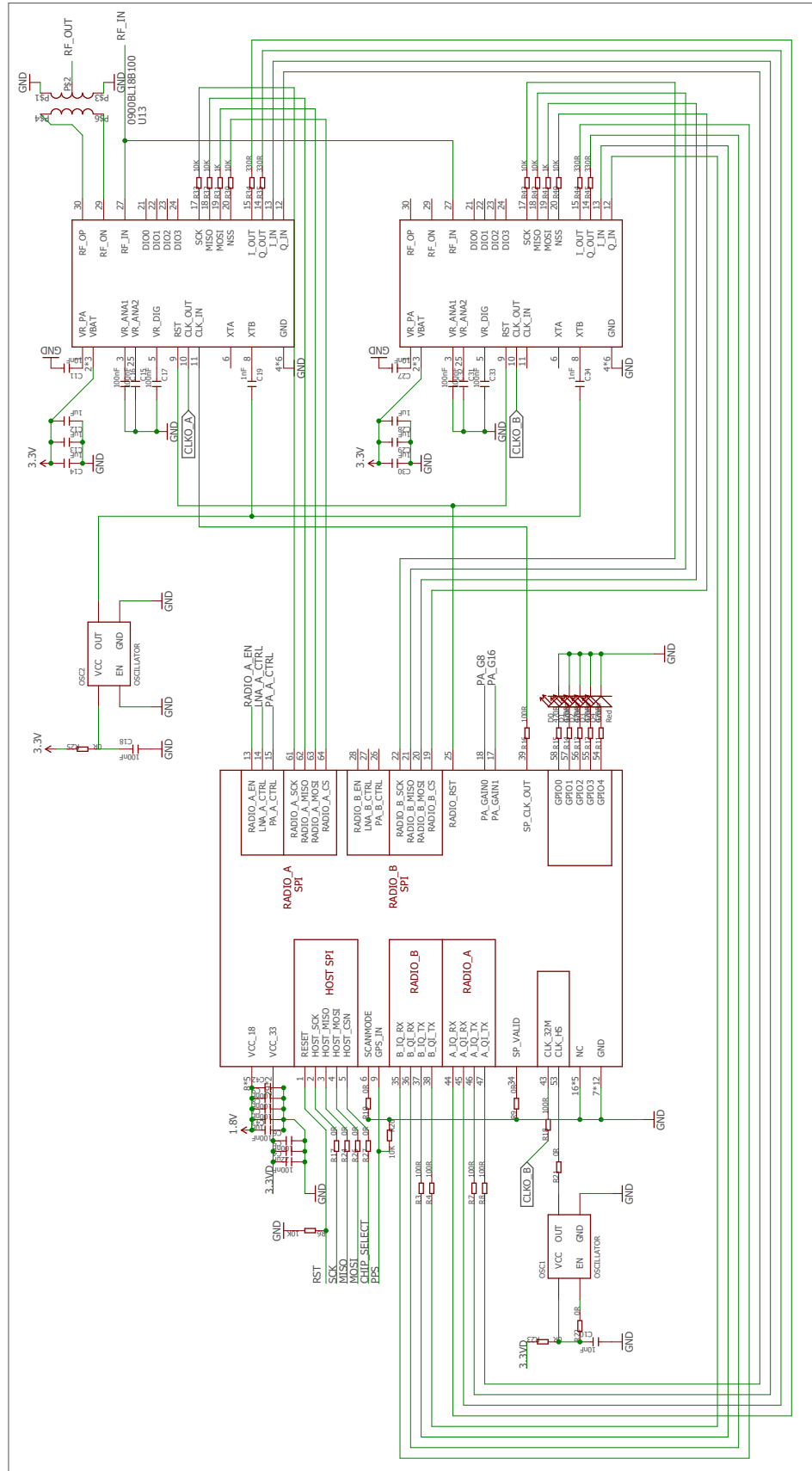
```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── sourcecode ..... zdrojové kódy
│   ├── gmap_localization.rar ..... program pro výpočet polohy
│   ├── lora_gps_logger_nucleo_64.rar ..... testovací GPS senzor
│   └── tdoa_simulation.rar ..... simulační program
├── readme.txt ..... stručný popis obsahu
└── thesis.pdf ..... text diplomové práce
```

## B Návrh LoRaWAN™ koncentrátoru



Obr. B.1: RF část LoRaWAN™ koncentrátoru

## SX130X and SX125X

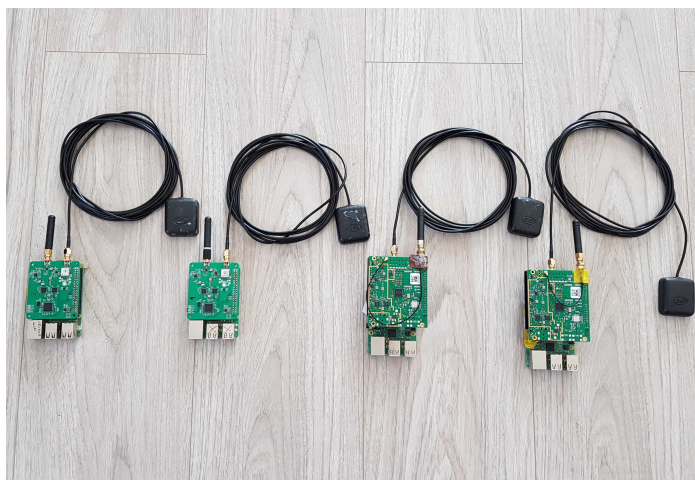


Obr. B.2: Integrované obvody SX1301 a SX1257 LoRaWAN™ koncentrátoru





## C Brány pro testování lokalizace



Obr. C.1: Brány připravené na testovací měření



Obr. C.2: Rozmístování LoRaWAN™ brán pro měření